



**Cláudia Patrícia
Cândido do Amaral**

**Análise numérica do comportamento de madres
enformadas a frio**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Paulo Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Aos meus pais, pelo apoio
Ao meu namorado, pela dedicação

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Miguel de Freitas Castro
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

agradecimentos

O presente trabalho resulta do meu esforço pessoal, em que a colaboração que me foi prestada assumiu um papel importante, por isso, gostaria de aqui expressar o meu reconhecimento e sinceros agradecimentos a todos os que me ajudaram a realizar este objectivo pessoal.

Assim, começaria por agradecer ao Professor Doutor Paulo Vila Real, respectivamente meu orientador, e ao Eng. Nuno Lopes, pela partilha de conhecimentos, pela sua amizade, dedicação e disponibilidade, pelo auxílio prestado na utilização do programa SAFIR.

À empresa Constálica SA e a todos os seus colaboradores pelo incentivo e apoio dado durante a elaboração deste trabalho.

Um agradecimento especial ao meu amigo Eng. Alexandre Nolasco, pela sua amizade, companheirismo, compreensão e constante incentivo ao longo da realização da dissertação.

A todos os meus amigos pelo incentivo e preocupação ao longo da realização deste trabalho.

À minha Família, em especial aos meus pais, ao meu irmão e aos meus sobrinhos, pela forma como me acompanharam e ajudaram para a conclusão de mais uma etapa da minha formação.

Finalmente, um agradecimento muito especial ao meu namorado Tiago Silva, pelo seu carinho e amizade, paciência e incondicional apoio que sempre demonstrou. Muito obrigado pelas conversas e palavras de coragem nos momentos menos bons, bem como a força transmitida.

A todos, o meu OBRIGADO.

palavras-chave

perfis enformados a frio, modelação numérica, encurvadura.

resumo

A presente dissertação apresenta um estudo numérico do comportamento de madres enformadas a frio, o sistema MadreMax. Este tipo de estudo é de grande importância devido ao aumento da utilização de estruturas de aço enformadas a frio, conciliando a inovação com a validação de um sistema em ampla expansão.

O sistema inovador de madres, designadas comercialmente por MadreMax, foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro para a empresa Constálica. Com o objectivo de verificar e validar a resistência mecânica dos perfis enformados a frio MadreMax, foi feita uma modelação numérica do seu comportamento, dando particular atenção à encurvadura dos seus banzos livres e ao comportamento dos reforços utilizados para aumentar a capacidade resistente das mesmas.

Na modelação numérica utilizou-se o programa GID para obtenção da malha numérica e o programa de elementos finitos material e geometricamente não-linear SAFIR para análise ao comportamento mecânico, desenvolvido na Universidade de Liège, na Bélgica. Efectuaram-se várias análises numéricas para calibração dos modelos propostos, com recurso aos resultados dos ensaios experimentais realizados aos perfis enformados a frio MadreMax.

Os resultados numéricos foram comparados com resultados de ensaios experimentais e com resultados analíticos.

Finalmente, são referidos alguns aspectos do comportamento dos perfis enformados a frio MadreMax que deverão ser tidos em consideração em futuros trabalhos neste campo de secções Ómega MadreMax.

keywords

cold formed sections, numerical modeling, buckling.

abstract

This thesis presents a numerical study of the behavior of cold formed purlings, the MadreMax system. This type of study has a great importance due the increasing of the use of cold formed steel structures, combining innovation with the validation of a wide expansion system.

The innovative system of purling, commercially called MadreMax, was developed by the department of civil Engineering at the University of Aveiro to Constálica SA. To verify and validate the mechanical strength of the cold formed sections MadreMax, a numeric model of their behavior has been used giving particularly attention to the lateral buckling of their free flanges and to the behavior of the reinforcements used to increase the mechanical resistance.

In the numeric modeling, the GID program was used, to obtain the numerical mesh and the nonlinear finite element program SAFIR for the mechanical behavior evaluation, developed in the University of Liège in Belgium.

Several numeric tests for the models calibration were made, using experimental test results, made to the cold formed sections MadreMax.

The numeric results were compared against the experimental results and the analytical results.

Finally, are referred some aspects of the cold formed sections behavior, so called MadreMax to consider in future works.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS	vii
NOMENCLATURA.....	ix
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	3
1.1. Considerações Gerais	3
1.2. Objectivos e metodologia.....	4
1.3. Estruturação da Tese	4
CAPÍTULO 2 – PERFIS ENFORMADOS A FRIO.....	9
2.1. Considerações Gerais	9
2.2. Secções Transversais de Classe 4.....	14
2.3. Sistema MadreMax	23
2.3.1. <i>Desenvolvimento</i>	23
2.3.2. <i>Processo de Fabrico</i>	33
CAPÍTULO 3 – ANÁLISE NUMÉRICA.....	41
3.1 Considerações gerais	41
3.2 O programa GID.....	41
3.2.1. <i>Descrição geral</i>	42
3.2.2. <i>A Malha</i>	43
3.3 O programa SAFIR	43
3.3.1. <i>Descrição geral</i>	43
3.3.2. <i>Elementos de casca</i>	44
3.4 O modelo numérico.....	44
3.4.1. <i>Considerações gerais</i>	44
3.4.2. <i>Análise de sensibilidade</i>	45
CAPÍTULO 4 – ESTUDO PARAMÉTRICO.....	53
4.1. Casos de Estudo	53
4.1.1. <i>Ensaio numéricos à secção transversal $\varnothing 100 \times 1.5$</i>	54
4.1.1.1. Ensaio 1	54
4.1.1.2. Ensaio 2	55
4.1.1.3. Ensaio 3	57

4.1.2.	<i>Ensaio numéricos à secção transversal Q150x1.5</i>	58
4.1.2.1.	Ensaio 4	59
4.1.2.2.	Ensaio 5	59
4.1.2.3.	Ensaio 6	61
4.1.3.	<i>Ensaio numéricos à secção transversal Q200x2.0</i>	62
4.1.3.1.	Ensaio 7	63
4.1.3.2.	Ensaio 8	63
4.2.	Análise de Resultados	65
4.3.	Comparação com os ensaios experimentais	72
4.4.	Comparação com os resultados analíticos.....	76
 CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS		81
5.1.	Conclusões finais.....	81
5.2.	Desenvolvimentos futuros.....	83
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de formas de perfis enformados a frio. [2].....	9
Figura 2 – Exemplos de chapas perfiladas. [2]	10
Figura 3 – Exemplos da carga crítica para os vários modos de encurvadura em função do comprimento de encurvadura [2].	12
Figura 4 – Exemplos dos modos de encurvadura por distorção [2].	12
Figura 5 – Exemplo de perfis enformados a frio em que o centro de corte não coincide com o centro de gravidade.	13
Figura 6 – Construção de um pavilhão em “Light Steel Framing”	14
Figura 7 – Elementos internos [5]	15
Figura 8 – Elementos salientes [5]	16
Figura 9 – Ângulos [5]	17
Figura 10 – Classificação das secções transversais em função do seu momento resistente e da sua capacidade de rotação [6].....	19
Figura 11 – Curvas momento-rotação para as várias classes de secções transversais [6].....	20
Figura 12 – Secção Transversal de Classe 4 – Força Axial [8].....	20
Figura 13 – Secção Transversal de Classe 4 – Momento Flector [8].....	21
Figura 14 – Elementos internos comprimidos [5]	21
Figura 15 – Elementos salientes comprimidos [8].	22
Figura 16 – Madres enformadas a frio MadreMax. [9].....	23
Figura 17 – Secção Transversal [10].....	24
Figura 18 – Secção bruta e secção efectiva do perfil MadreMax [1].....	25
Figura 19 – Secções transversais efectivas [1].....	27
Figura 20 – Viga contínua de 5 vãos com sobreposição e reforço. [10]	29
Figura 21 – Diagrama de momentos de uma viga contínua de 5 vãos. [10]	29
Figura 22 – Sobreposição no apoio. [11]	30
Figura 23 – Sobreposição no vão. [11]	30
Figura 24 – Viga continua com 5 vãos. [11]	30
Figura 25 – Programa de cálculo das MadreMax. [9].....	33
Figura 26 – Imagem do desenrolador com a bobine	34
Figura 27 – Imagem do punção de furação da chapa	35
Figura 28 – Imagem da perfiladora	35
Figura 29 – Imagem do corte da chapa por um sistema de guilhotina	36
Figura 30 – Imagem do embalamento na esteira.....	36
Figura 31 – Armazenamento das madres	37

Figura 32 – Imagem do programa GID	41
Figura 33 – Capacidades do programa GID [14]	42
Figura 34 – Definição da geometria e dos eixos locais [18]	44
Figura 35 – Imagem da malha com furos e sem furos	45
Figura 36 – Imagem da viga deformada localmente devido a forças concentradas	48
Figura 37 – Imagem da viga com carga distribuída	48
Figura 38 – Imagem de um apoio duplo e um apoio simples.....	50
Figura 39 – Caracterização geométrica da secção $\Omega 100 \times 1.5$ [9]	54
Figura 40 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 1, Ensaio 4 e Ensaio 7.....	54
Figura 41 – Ensaio de flexão simples $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.....	55
Figura 42 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 2.....	56
Figura 43 – Ensaio de flexão simples $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 2.....	56
Figura 44 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 3.....	57
Figura 45 – Ensaio de flexão simples $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 3.....	58
Figura 46 – Caracterização geométrica da secção $\Omega 150 \times 1.5$ [9]	58
Figura 47 – Ensaio de flexão simples $\Omega 150 \times 1.5$ – Ensaio 4.....	59
Figura 48 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 5.....	60
Figura 49 – Ensaio de flexão simples $\Omega 150 \times 1.5$ – Ensaio 5.....	60
Figura 50 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 6.....	61
Figura 51 – Ensaio de flexão simples $\Omega 150 \times 1.5$ – Ensaio 6.....	62
Figura 52 – Caracterização geométrica da secção $\Omega 200 \times 2.0$ [9]	62
Figura 53 – Ensaio de flexão simples $\Omega 200 \times 2.0$ – Ensaio 7.....	63
Figura 54 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 8.....	64
Figura 55 – Ensaio de flexão simples $\Omega 200 \times 2.0$ – Ensaio 8.....	64
Figura 56 – Viga inicial da simulação do ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.....	65
Figura 57 – Rotação da viga da simulação do ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1. Factor de escala de 3.....	66
Figura 58 – Formação de um vinco numa das almas da madre no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.	66
Figura 59 – Comportamento força - deslocamento num ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.	67
Figura 60 – Esquema de localização dos pontos de medição dos deslocamentos horizontais....	67
Figura 61 – Comportamento força - deslocamento relativo horizontal num ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.....	68
Figura 62 – Comportamento força - deslocamento relativo horizontal num ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 150 \times 1.5$ – Ensaio 6.....	68

Figura 63 – Esquema de localização dos pontos de medição dos deslocamentos verticais	69
Figura 64 – Comportamento força - deslocamento vertical num ponto da aba direita e num ponto da aba esquerda no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.	69
Figura 65 – Esquema rotação da secção transversal da madre.....	70
Figura 66 – Exemplo de um ensaio experimental realizado no LabEst – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural [22].....	72
Figura 67 – Exemplo de um ensaio experimental realizado no no LERF – Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo [22].	73
Figura 68 – Pormenor da rotação da secção do perfil MadreMax – Ensaio experimental vs Ensaio numérico (Ensaio 1).	73
Figura 69 – Pormenor da deformação localizada nos pontos de aplicação da carga – Ensaio experimental vs Ensaio numérico (Ensaio 1).	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características geométricas da secção transversal bruta [1].....	25
Tabela 2 – Características geométricas da secção transversal efectiva [1].	26
Tabela 3 – Tabelas de pré-dimensionamento para a flexão simples e flexão desviada. [1].....	31
Tabela 4 – Tabela de resultados da viga com malha com furos vs viga com malha sem furos ..	46
Tabela 5 – Tabela de resultados da viga com imperfeição inicial vs viga sem imperfeição inicial	47
Tabela 6 – Tabela de resultados de ambos os modelos vs ensaio experimental equivalente	49
Tabela 7 – Resultados dos ensaios numéricos.....	71
Tabela 8 – Resultados dos ensaios numéricos vs ensaios experimentais	75
Tabela 9 – Resultados dos ensaios numéricos vs ensaios analíticos	77

NOMENCLATURA

Letras maiúsculas latinas

A. bruta ou A_g	Área da secção transversal sem furos
A. furada	Área da secção transversal com furos
A_{eff}	Área da secção transversal efectiva
A_{vz}	Área resistente ao corte da secção transversal
C_1, C_2, C_3	Factores que dependem do carregamento e das condições de apoio
E	Módulo de Elasticidade
G	Módulo de Corte $G = \frac{E}{2(1-\nu)}$
G	Centro de gravidade da secção bruta
G'	Centro de gravidade da secção efectiva
I_t	Constante de torção
I_w	Constante de empenamento
I_y	Momento de inércia em relação ao eixo yy
$I_{y,eff}$	Momento de inércia efectivo em relação ao eixo yy
I_z	Momento de inércia em relação ao eixo zz
$I_{z,eff}$	Momento de inércia efectivo em relação ao eixo zz
L	Comprimento da viga
M	Momento aplicado
$M_{b,Rd}$	Momento resistente à encurvadura lateral
M_{cr}	Momento crítico elástico à encurvadura lateral
$M_{c,Rd}$	Momento resistente da secção
$M_{c,y,Rd}$	Momento elástico resistente segundo o eixo yy
$M_{c,z,Rd}$	Momento elástico resistente segundo o eixo zz
$M_{eff,y,Rd}$	Momento efectivo resistente em relação ao eixo yy
$M_{eff,z,Rd}$	Momento efectivo resistente em relação ao eixo zz
M_{el}	Momento elástico resistente da secção transversal
M_{pl}	Momento plástico resistente da secção transversal
M_{Rd}	Momento resistente
$M_{y,Ed}$	Momento actuante em relação ao eixo yy
$M_{z,Ed}$	Momento actuante em relação ao eixo zz

P	Carga pontual
$W_{eff,min}$	Módulo de flexão mínimo da secção efectiva
$W_{eff,y,min}$	Módulo de flexão mínimo da secção efectiva em relação ao eixo yy
$W_{eff,y,i}$	Módulo de flexão inferior da secção efectiva em relação ao eixo yy
$W_{eff,y,s}$	Módulo de flexão superior da secção efectiva em relação ao eixo yy
$W_{eff,z,min}$	Módulo de flexão mínimo da secção efectiva em relação ao eixo zz
$W_{el,y,min}$	Módulo de flexão elástico mínimo em relação ao eixo yy
$W_{el,z}$	Módulo de flexão elástico em relação ao eixo zz
$W_{pl,y}$	Módulo de flexão plástico em relação ao eixo yy
$W_{pl,z}$	Módulo de flexão plástico em relação ao eixo zz

Letras minúsculas latinas

a	Comprimento de sobreposição a meio vão
b	Largura da secção efectiva
b_{eff}	Largura efectiva da secção transversal
c	Largura de uma parte da secção transversal
c.c.	Centro de corte
c.g.	Centro de gravidade
d	Diâmetro do círculo de secções tubulares
f_y	Tensão de cedência
f_{ya}	Tensão de cedência média
f_{yb}	Tensão de cedência
f_u	Tensão de rotura
h	Altura da secção transversal
i_y	Raio de giração em relação ao eixo yy
i_z	Raio de giração em relação ao eixo zz
k	Coeficiente que depende do tipo de enformagem e que toma os valores de 7 (enformagem a frio) e 5 (outro processo de enformagem)
k_σ	Coeficiente de encurvadura
k_z, k_w	Factores de comprimento efectivo
n	Número de dobras a 90° da secção transversal
$q_{y,max}$	Carga máxima segundo o eixo yy
q_z	Carga segundo o eixo zz

t	Espessura
x_1, x_2	Distância da sobreposição no primeiro apoio
z	Comprimento de sobreposição sobre os apoios
z_a	Posição do ponto de aplicação das cargas
z_s	Posição do centro de corte

Caracteres do alfabeto grego

α	Parcela de uma parte da secção transversal à compressão
α_{LT}	Factor de imperfeição para a encurvadura lateral
ϕ	Rotação (curvatura) da secção transversal
ϕ_{LT}	Coefficiente utilizado para o cálculo do factor de redução de encurvadura lateral
ϕ_{pl}	Rotação (curvatura) da secção requerida para gerar uma distribuição de tensões plástica total
γ_{M0}	Coefficiente parcial de segurança para as resistências das secções transversais, para qualquer classe é igual a 1,0
γ_{M1}	Coefficiente parcial de segurança de resistência de elementos sujeitos à encurvadura (neste trabalho usou-se $\gamma_{M1} = 1,0$)
ε	Extensão
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza adimensional normalizada para encurvadura lateral
π	pi
ρ	Factor de redução
ν	Coefficiente de poisson
χ_{LT}	Factor de redução para a encurvadura lateral
ψ	Relação tensão e extensão
Ω	Secção de madres do tipo Ómega

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

O Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro desenvolveu um sistema inovador de madres, designadas comercialmente por MadreMax, para a empresa Constálica, SA. O desenvolvimento deste sistema compreendia três fases, a definição e caracterização geométrica das secções transversais com vista ao dimensionamento através do EC3 (Fase I), a análise e optimização estrutural (Fase II) e finalmente uma análise laboratorial para a validação mecânica e posterior validação numérica (Fase III).

A escolha do tema desta dissertação teve como principal razão a necessidade da empresa Constálica S.A. em conjunto com o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, de modelar numericamente o comportamento das madres enformadas a frio MadreMax, bem como, contribuir para a inovação no domínio das estruturas de aço enformadas a frio, tratando-se de um sistema em amplo desenvolvimento.

Este tema enquadra-se na Fase III do estudo, que consiste na verificação e validação da resistência mecânica dos perfis MadreMax através da modelação numérica do seu comportamento.

O interesse neste tema está relacionado com o aumento da utilização de estruturas enformadas a frio no mercado da construção e na validação de um sistema em ampla expansão.

As vantagens do sistema MadreMax surgem quer a níveis económicos quer a níveis estruturais, visto que, este sistema possibilita um aligeiramento das estruturas e uma grande flexibilidade de soluções.

MadreMax, é um elemento estrutural destinado à aplicação em estruturas de aço ou de betão. A sua principal característica é a possibilidade de sobreposição sucessiva, sendo a continuidade e rigidez asseguradas pelos pontos de furação. Permite também o cruzamento entre elementos de secção igual ou diferente. [1]

As suas principais vantagens são:

- Flexibilidade de soluções;
- Aligeiramento da estrutura;
- Aparafusamento directo ao pilar e ao pórtico;
- Economia de material, mão-de-obra, fabrico e montagem;
- Facilidade de montagem;
- Rapidez de montagem;
- Dispensa de patilhas, conectores e tirantes entre madres.

1.2. Objectivos e metodologia

A presente dissertação teve como principal objectivo a verificação e validação da resistência mecânica dos perfis MadreMax através da modelação numérica do seu comportamento, dando particular atenção à encurvadura dos seus banzos livres e ao comportamento dos reforços utilizados para aumentar a capacidade resistente das mesmas.

Para atingir os objectivos acima indicados, avaliou-se numericamente o comportamento das madres enformadas a frio MadreMax usando o programa GID para obtenção da malha de elementos finitos e o programa de elementos finitos material e geometricamente não-linear SAFIR para obtenção do comportamento mecânico, desenvolvido na Universidade de Liège, na Bélgica.

Com o intuito de obter-se um modelo o mais preciso possível, efectuaram-se várias análises numéricas com base nos resultados dos ensaios experimentais realizados aos perfis enformados a frio MadreMax.

1.3. Estruturação da Tese

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos que mostram a sequência dos estudos efectuados e os aspectos essenciais de cada capítulo. No presente capítulo apresenta-se uma breve introdução ao tema em estudo, são resumidos os objectivos principais e descreve-se o trabalho muito sucintamente.

No capítulo 2 apresentam-se os conceitos teóricos mais relevantes, nomeadamente a descrição de perfis enformados a frio e de secções transversais de classe 4. É apresentado o desenvolvimento do sistema MadreMax, bem como, o seu processo de fabrico.

No capítulo 3 é feita uma descrição do programa GID e do programa de elementos finitos SAFIR, os programas utilizados para a obtenção dos resultados obtidos nesta dissertação. Estes resultados serviram de base para a validação da resistência mecânica dos perfis enformados a frio MadreMax. Neste capítulo também se realiza uma análise de sensibilidade ao modelo numérico desenvolvido e implementado no programa de cálculo tendo como base os resultados obtidos nos ensaios experimentais ao comportamento do sistema MadreMax.

No capítulo 4 descreve-se os casos de estudo de avaliação do comportamento do sistema MadreMax e analisa-se os resultados obtidos com o programa SAFIR. Desta forma, realiza-se uma comparação entre os resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos experimentalmente e analiticamente.

No capítulo 5 apresenta-se as principais conclusões da presente dissertação e são referidas algumas das possibilidades de desenvolvimento futuro.

CAPÍTULO 2

PERFIS ENFORMADOS A FRIO

CAPÍTULO 2 – PERFIS ENFORMADOS A FRIO

2.1. Considerações Gerais

Existem dois tipos de elementos estruturais em aço enformados a frio, os perfis e as chapas perfiladas. São elementos com secção de parede muito fina comparativamente, por exemplo, aos elementos estruturais em aço laminados a quente.

Os perfis enformados a frio são fabricados a partir da dobragem de chapas de aço com espessura constante. São peças de eixo recto, secção uniforme e geometria da secção transversal variável devido à sua aplicação, podendo apresentar várias formas e dimensões (ver Figura 1). Estes elementos estruturais são normalmente utilizados em pórticos industriais como elementos de cobertura (madres) ou de fachada.

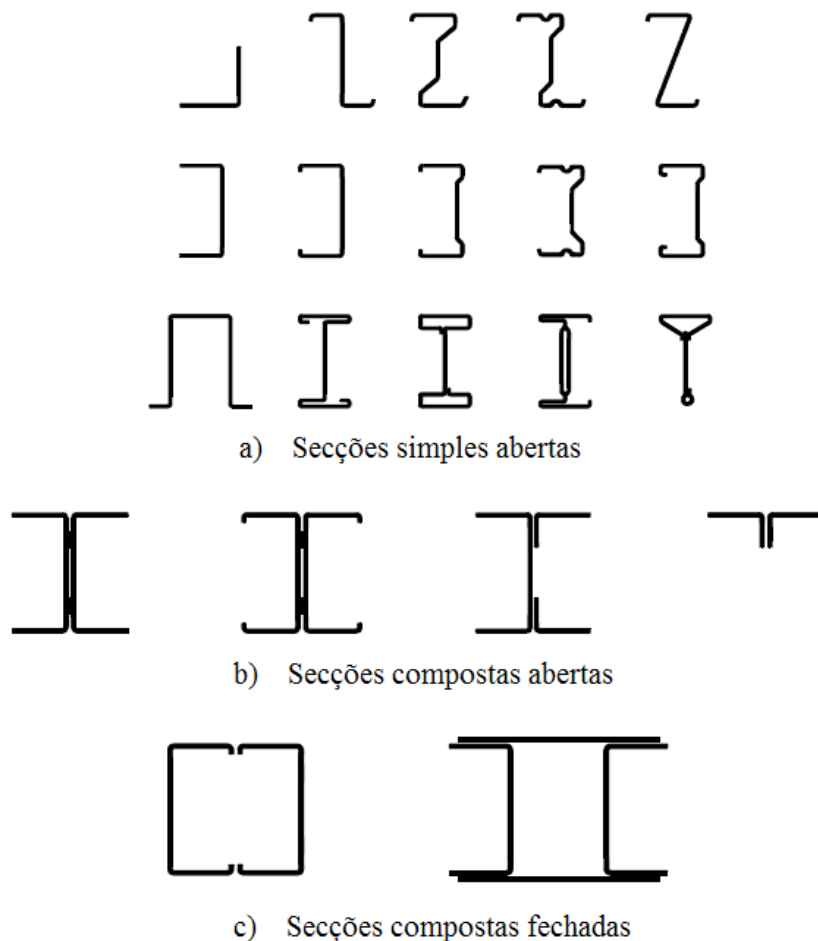


Figura 1 – Exemplos de formas de perfis enformados a frio. [2]

As chapas perfiladas são, também, fabricadas a partir da dobragem de chapas de aço com espessura constante, sendo esta espessura normalmente inferior à dos perfis (ver Figura 2). São peças laminares com superfície média poligonal, utilizadas em lajes mistas e em estruturas de suporte de paredes, pavimentos e coberturas.

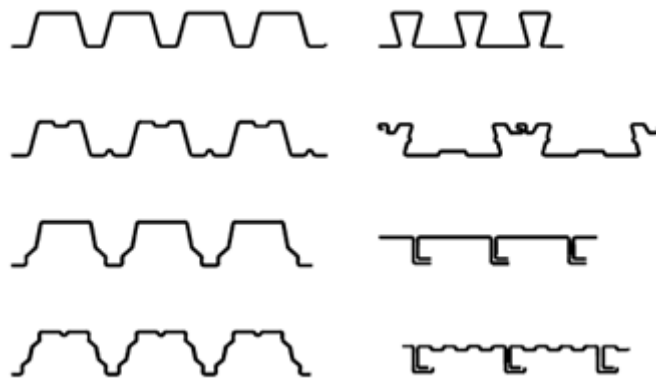


Figura 2 – Exemplos de chapas perfiladas. [2]

Comparativamente aos perfis laminados a quente, os perfis enformados a frio são caracterizados por [3]:

- Elevada esbelteza;
- Existência de secções sem qualquer simetria;
- A grande maioria das secções é aberta e não ramificada;
- Imperfeições geométricas semelhantes à espessura da chapa;
- Existência de zonas da secção reforçadas e outras não reforçadas;
- Existência de zonas de furação;
- A mesma espessura em todas as partes da secção.

A análise e o dimensionamento dos elementos de aço enformados a frio está descrita na Parte 1-3 (Regras Gerais e Regras Suplementares para Elementos de Aço Enformados a Frio) do Eurocódigo 3 [2].

Os aços utilizados, normalmente, para o fabrico dos elementos de aço enformados a frio são aços galvanizados em que a tensão de cedência se encontra entre 220 MPa e 500 MPa, a tensão última entre 300 MPa e 720 MPa e a extensão máxima entre 10% e 25%. O processo de fabrico de elementos de aço enformados a frio produz alterações nas propriedades mecânicas do aço, nomeadamente devido ao endurecimento por deformação resultante do seu processo de fabrico. Assim, o processo de fabrico de elementos de aço enformados a frio pode levar ao aumento da tensão de cedência e da tensão última no aço, e a uma diminuição da sua ductilidade. São

particularmente importantes neste processo, o raio de dobragem, a espessura da chapa e o tipo de aço.

O aumento da tensão de cedência do aço pode ser considerado no dimensionamento das secções transversais de acordo com a cláusula 3.2.1. do Eurocódigo 3 Parte 1-3 [2]. A tensão de cedência média (f_{ya}) pode ser determinada experimentalmente ou analiticamente pela seguinte expressão:

$$f_{ya} = f_{yb} + \frac{knt^2}{A_g} (f_u - f_{yb}) \quad (1)$$

$$f_{ya} \leq \frac{f_u + f_{yb}}{2} \quad (2)$$

em que, t é a espessura do material antes da enformagem, A_g a área bruta da secção transversal, k o coeficiente que depende do tipo de enformagem e que toma os valores 7 (no caso de enformagem a frio) e 5 (no caso de qualquer outro processo de enformagem) e n o número de dobras a 90° da secção transversal.

Quando a secção transversal é totalmente efectiva, a sua resistência é calculada usando a tensão de cedência média, nos restantes casos é usada a tensão de cedência nominal. Caso os membros sejam sujeitos a tratamentos a quente depois de enformados a frio, o aumento da tensão de cedência não deve ser considerado.

O comportamento estrutural dos elementos de aço enformados a frio é influenciado pelos fenómenos de instabilidade local e/ou global devido à elevada esbelteza e à grande deformabilidade à torção (em algumas secções o centro de corte não coincide com o centróide).

Os fenómenos de encurvadura local devem-se ao facto dos diferentes elementos que constituem a secção transversal terem elevada esbelteza, apesar de, no dimensionamento de elementos esbeltos dever-se considerar a reserva de pós-encurvadura. A encurvadura por distorção é característica de secções transversais impedidas de deformar lateralmente e/ou à torção e ocorre em membros comprimidos e/ou flectidos (ver Figura 4).

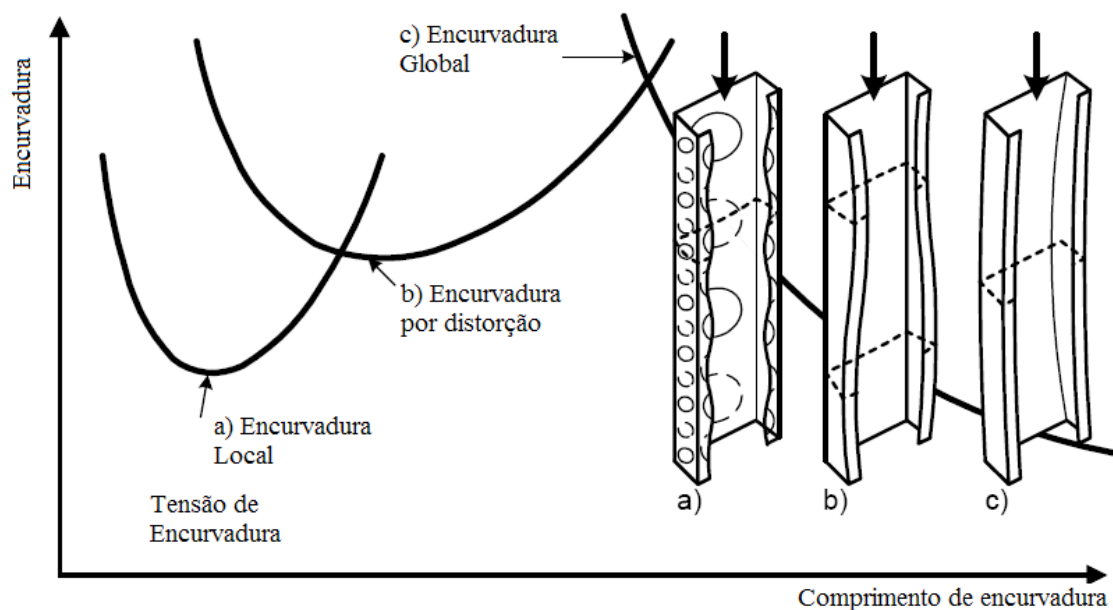


Figura 3 – Exemplos da carga crítica para os vários modos de encurvadura em função do comprimento de encurvadura [2].

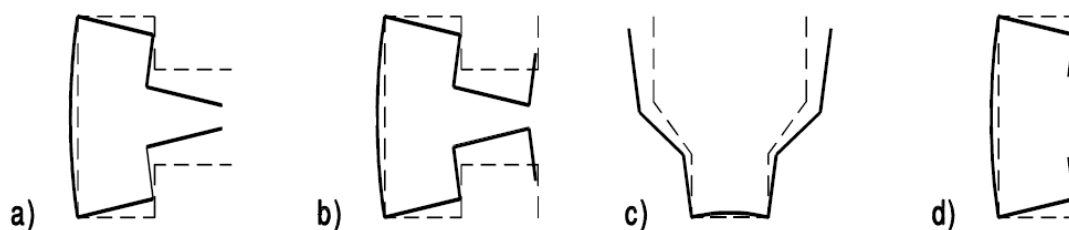


Figura 4 – Exemplos dos modos de encurvadura por distorção [2].

Normalmente, os perfis enformados a frio necessitam, ao longo do seu comprimento, de ser restringidos à torção, pois possuem uma baixa rigidez à torção devido à elevada esbelteza das secções transversais. Isto porque o centro de corte não coincide com o centro de gravidade da secção transversal, assim, é necessário considerar momentos torsores secundários resultantes da excentricidade entre o eixo de aplicação das cargas e o centro de corte.

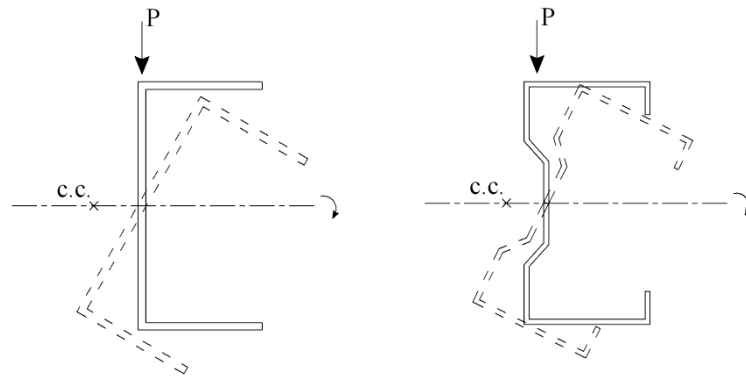


Figura 5 – Exemplo de perfis enformados a frio em que o centro de corte não coincide com o centro de gravidade.

Numa altura em que o preço do aço atinge valores bastante elevados, os perfis enformados a frio constituem uma solução eficiente e económica em muitas aplicações.

O aumento de utilização de estruturas enformadas a frio no mercado da construção tem a ver com a economia da sua produção, armazenamento e transporte, a elevada relação entre a resistência e o peso, a flexibilidade de soluções o aligeiramento das estruturas.

Da utilização de estruturas enformadas a frio surgiu o “Light Steel Framing” que é um sistema construtivo estruturado em perfis de aço enformados a frio, projectado para trabalhar em conjunto com outros subsistemas construtivos. É um sistema construtivo aberto, flexível, que permite a utilização de diversos materiais. [4]



Figura 6 – Construção de um pavilhão em “Light Steel Framing”

No sistema “Light Steel Framing” torna-se indispensável, em fase de projecto, a coordenação modular e a utilização de malhas construtivas, permitindo a redução de custos ao nível de fabricação e montagem da estrutura. [4]

2.2. Secções Transversais de Classe 4

De acordo com o Eucódigo 3 Parte 1-1 [5] as secções são classificadas através de valores limites para a esbelteza, ou seja a relação entre o comprimento e a espessura, b/t , de um elemento, tendo em conta a distribuição de tensões ao longo do elemento de acordo com as Figuras 7 e 8.

Internal compression parts						
				Axis of bending		
Class	Part subject to bending	Part subject to compression	Part subject to bending and compression			
1						
	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha < 0,5$: $c/t < \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
3						
	$c/t < 124\varepsilon$	$c/t < 42\varepsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ when $\psi \leq -1^*)$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$c = \sqrt{235/f_y}$	f_y ε	235 1,00	275 0,92	355 0,81	420 0,75	460 0,71

*) $\psi \leq -1$ applies where either the compression stress $\sigma \leq f_y$ or the tensile strain $\varepsilon_y > f_y/E$

Figura 7 – Elementos internos [5]

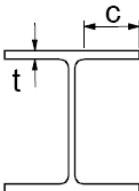
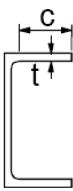
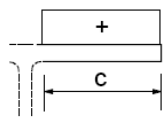
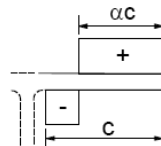
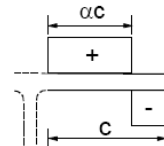
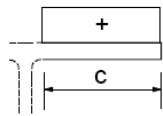
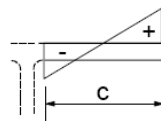
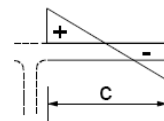
Outstand flanges						
						
Rolled sections			Welded sections			
Class	Part subject to compression	Part subject to bending and compression				
		Tip in compression		Tip in tension		
Stress distribution in parts (compression positive)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Stress distribution in parts (compression positive)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ For k_σ see EN 1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Figura 8 – Elementos salientes [5]

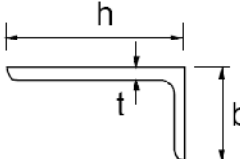
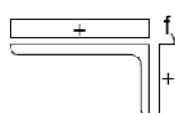
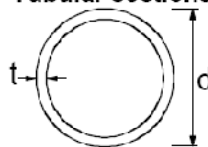
<div>Angles</div> <div></div> <div>Refer also to “Outstand flanges” (see sheet 2 of 3)</div> <div>Does not apply to angles in continuous contact with other components</div>																			
Class	Section in compression																		
Stress distribution across section (compression positive)	<div></div>																		
3	$h/t \leq 15\varepsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$																		
<div>Tubular sections</div> <div></div>																			
Class	Section in bending and/or compression																		
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$																		
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$																		
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$																		
NOTE For $d/t > 90\varepsilon^2$ see EN 1993-1-6.																			
$s = \sqrt{235/f_y}$	<table><tr><td>f_y</td><td>235</td><td>275</td><td>355</td><td>420</td><td>460</td></tr><tr><td>ε</td><td>1,00</td><td>0,92</td><td>0,81</td><td>0,75</td><td>0,71</td></tr><tr><td>ε^2</td><td>1,00</td><td>0,85</td><td>0,66</td><td>0,56</td><td>0,51</td></tr></table>	f_y	235	275	355	420	460	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51
f_y	235	275	355	420	460														
ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71														
ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51														

Figura 9 – Ângulos [5]

Os critérios de classificação das secções transversais são:

- Esbelteza das suas paredes;
- Resistência de cálculo;
- Capacidade de rotação plástica;
- Risco de encurvadura local.

Segundo o ponto 5.5 do Eucódigo 3 Parte 1-1 [5] as secções transversais podem classificar-se em:

- Classe 1: Secções transversais que podem mobilizar a sua resistência plástica, sem risco de encurvadura local, e possuindo uma grande capacidade de rotação permitindo a formação de uma rótula plástica (secção plástica);

- Classe 2: Secções transversais que podem mobilizar a sua resistência plástica, sem risco de encurvadura local, mas com uma capacidade de rotação limitada (secção compacta);
- Classe 3: Secções transversais que podem mobilizar a sua resistência elástica nas fibras extremas, mas não a sua resistência plástica em virtude do risco de ocorrência de encurvadura local (secção semi-compacta);
- Classe 4: Secções transversais que não podem atingir a sua resistência elástica em virtude do risco de encurvadura local (secção esbelta).

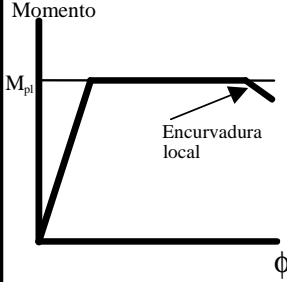
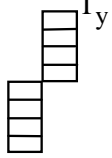
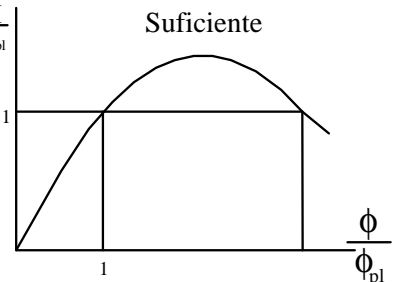
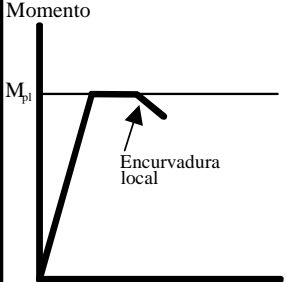
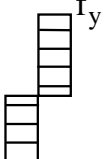
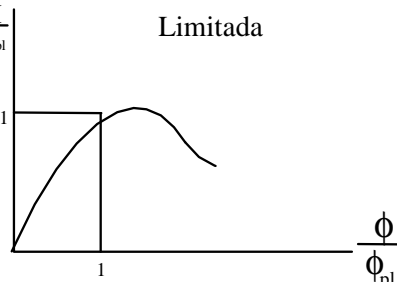
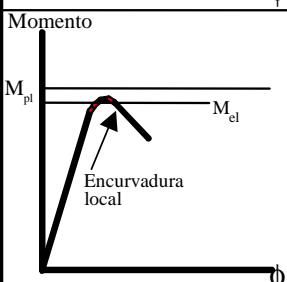
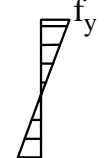
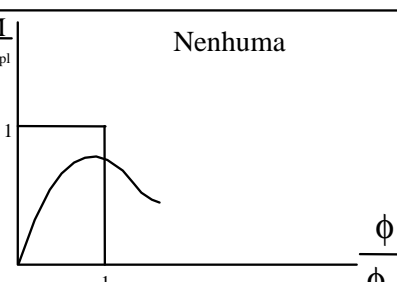
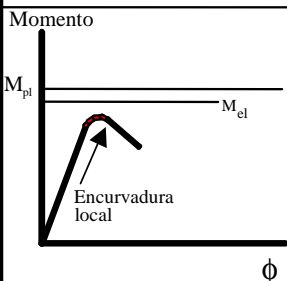
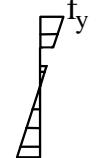
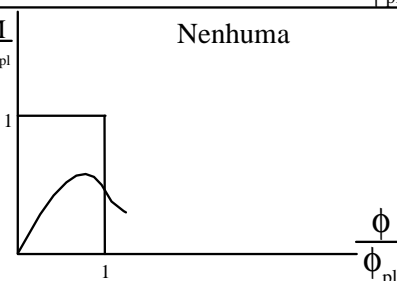
Modelo de comportamento	Momento resistente	Capacidade de rotação	Classe
 <p>Momento</p> <p>M_{pl}</p> <p>Encurvadura local</p> <p>ϕ</p>	<p>Momento plástico na secção transversal</p>  <p>f_y</p>	<p>$\frac{M}{M_{pl}}$</p> <p>Suficiente</p>  <p>1</p> <p>$\frac{\phi}{\phi_{pl}}$</p>	1
 <p>Momento</p> <p>M_{pl}</p> <p>Encurvadura local</p> <p>ϕ</p>	<p>Momento plástico na secção transversal</p>  <p>f_y</p>	<p>$\frac{M}{M_{pl}}$</p> <p>Limitada</p>  <p>1</p> <p>$\frac{\phi}{\phi_{pl}}$</p>	2
 <p>Momento</p> <p>M_{pl}</p> <p>M_{el}</p> <p>Encurvadura local</p> <p>ϕ</p>	<p>Momento elástico na secção transversal</p>  <p>f_y</p>	<p>$\frac{M}{M_{pl}}$</p> <p>Nenhuma</p>  <p>1</p> <p>$\frac{\phi}{\phi_{pl}}$</p>	3
 <p>Momento</p> <p>M_{pl}</p> <p>M_{el}</p> <p>Encurvadura local</p> <p>ϕ</p>	<p>Momento elástico na secção efectiva</p>  <p>f_y</p>	<p>$\frac{M}{M_{pl}}$</p> <p>Nenhuma</p>  <p>1</p> <p>$\frac{\phi}{\phi_{pl}}$</p>	4
<p>M_{el} momento elástico resistente da secção transversal</p> <p>M_{pl} momento plástico resistente da secção transversal</p> <p>M momento aplicado</p> <p>ϕ rotação (curvatura) da secção</p> <p>ϕ_{pl} rotação (curvatura) da secção requerida para gerar uma distribuição de tensões plástica total</p>			

Figura 10 – Classificação das secções transversais em função do seu momento resistente e da sua capacidade de rotação [6]

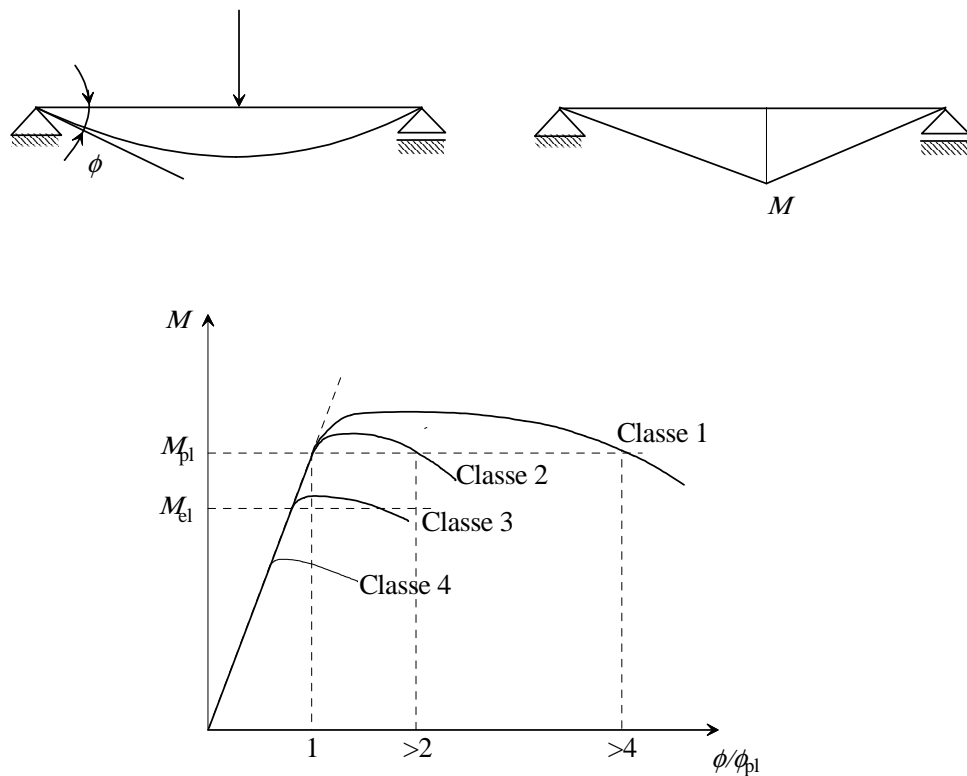


Figura 11 – Curvas momento-rotação para as várias classes de secções transversais [6]

O dimensionamento de elementos enformados a frio é feito com base no método das secções efectivas. Este método considera a redução da resistência da secção devido à encurvadura local através da redução da dimensão de cada um dos elementos da secção transversal (secção efectiva).

A elevada esbelteza dos perfis enformados a frio conduz a secções transversais de classe 4. A parte 1-3 do Eurocódigo 3 [2] fornece as verificações regulamentares para este tipo de secção. Um elemento enformado a frio é considerado como um conjunto de placas individuais, com determinadas condições de fronteira, de tal forma, que o comportamento individual de cada uma destas placas define o comportamento global da secção [7].

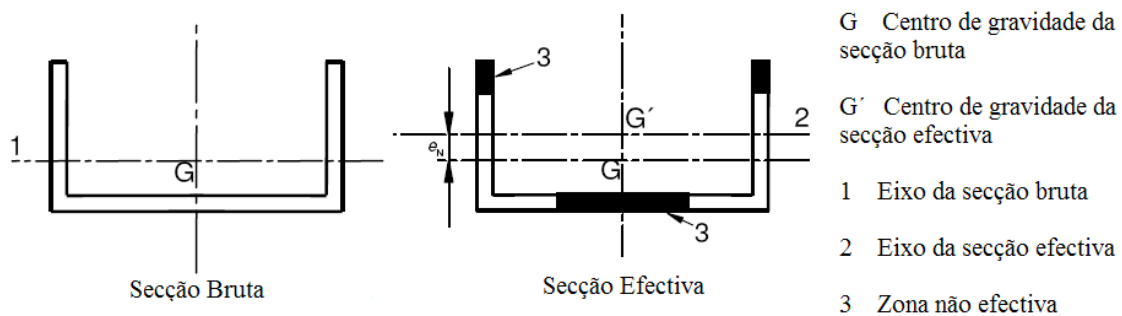


Figura 12 – Secção Transversal de Classe 4 – Força Axial [8].

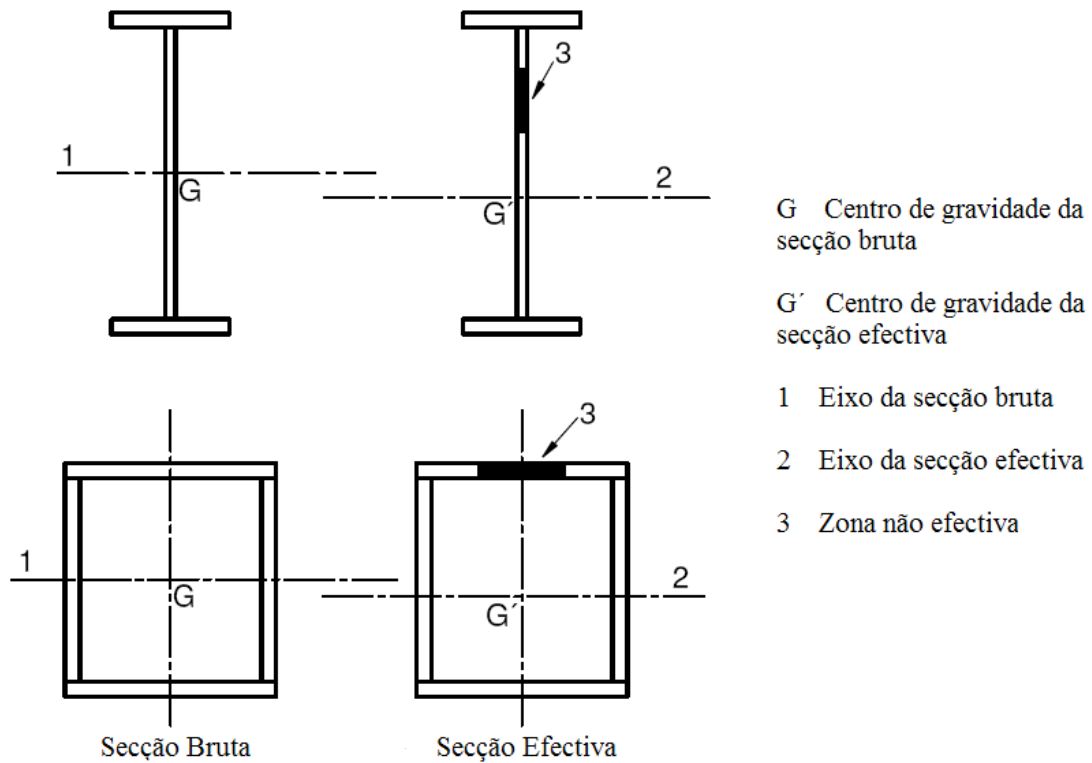


Figura 13 – Secção Transversal de Classe 4 – Momento Flector [8].

O procedimento de cálculo de secções de classe 4 começa por determinar a classe dos elementos comprimido. De acordo com a tabela 4.1 (para elementos internos comprimidos) e a tabela 4.2 (para elementos externos comprimidos) do Eucódigo 3 Part 1-5 [8] define-se a secção eficaz. Estes elementos estão representados na Figura 14 e 15 respectivamente.

Stress distribution (compression positive)				Effective ^p width b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Buckling factor k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Figura 14 – Elementos internos comprimidos [5]

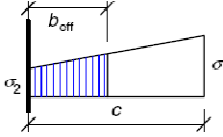
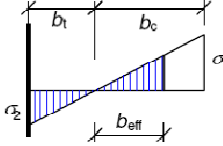
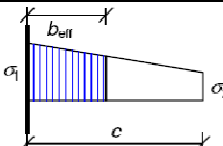
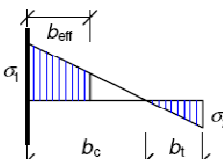
Stress distribution (compression positive)		Effective ^p width b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0$: $b_{\text{eff}} = \rho \ c$			
		$\psi < 0$: $b_{\text{eff}} = \rho \ b_c = \rho \ c \ / \ (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Buckling factor k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0$: $b_{\text{eff}} = \rho \ c$			
		$\psi < 0$: $b_{\text{eff}} = \rho \ b_c = \rho \ c \ / \ (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Buckling factor k_σ	0,43	$0,578 \ / \ (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Figura 15 – Elementos salientes comprimidos [8].

Conhecida a secção efectiva, há que determinar a nova posição do centro de gravidade e de seguida calcular o módulo de flexão da secção efectiva mínimo ($W_{eff,min}$). Assim, o momento resistente da secção ($M_{c,rd}$) é dado por:

$$M_{c,rd} = W_{eff,min} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3)$$

em que:

f_y é a tensão de cedência

γ_{M0} é o coeficiente parcial de segurança para a resistência das secções transversais, para qualquer classe é igual a 1,0.

2.3. Sistema MadreMax

2.3.1. Desenvolvimento

A área das estruturas de aço enformadas a frio é uma área na qual existe um enorme espaço para a inovação, como por exemplo o sistema MadreMax.

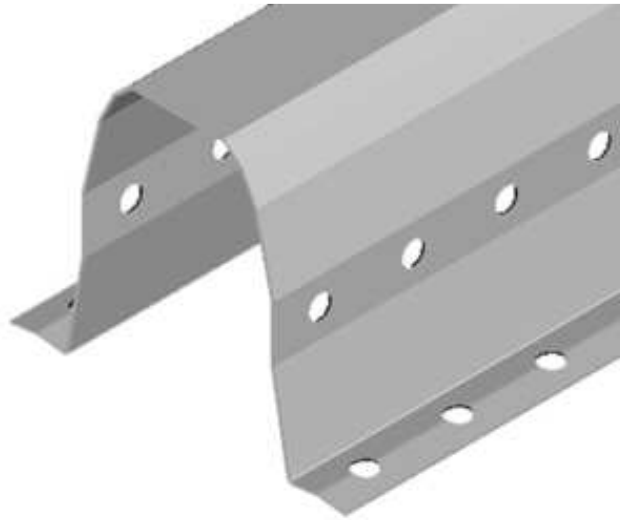


Figura 16 – Madres enformadas a frio MadreMax. [9].

MadreMax é um sistema de madres que se encontra patenteado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial, sob o registo de utilidade nº 9962, publicado no BPI nº 2/2005 de 10 de Janeiro de 2005. [1]

O sistema MadreMax é resultado de um estudo efectuado pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro conjuntamente com o Gabinete de Engenharia Pascal Engenheiros a pedido da empresa Constálica SA, com o objectivo de tirar partido da continuidade proporcionada por este sistema [10].

Este estudo contou com três fases distintas de desenvolvimento. A Fase I contemplou o estudo das secções MadreMax, bem como as suas características e a realização de um catálogo de apoio aos projectistas no seu pré-dimensionamento. A Fase II resumiu-se na criação de um software de cálculo automático para a verificação da segurança das madres. A Fase III diz respeito à realização de ensaios experimentais com as MadreMax com a finalidade de verificar e validar a resistência mecânica dos perfis. É nesta terceira fase que se enquadra o tema desta dissertação, que consiste

em modelar numericamente o comportamento das madres enformadas a frio MadreMax tendo em conta os ensaios experimentais [11] realizados às mesmas.

Foram estudadas três secções transversais, sendo elas: $\Omega 100 \times 1.5$; $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$. Em que o primeiro número corresponde à distância entre os furos da base e o segundo à espessura do perfil (ver b_1 na Figura 18).

O estudo teve como base o Eurocódigo 3 Parte 1-1 (Regras gerais e regras para edifícios) [5] e Parte 1-3 (Regras Gerais e Regras Suplementares para Elementos de Aço Enformados a Frio) [2].

A caracterização geométrica das secções teve como objectivo principal a diminuição da relação peso/rigidez possibilitando um aligeiramento das estruturas. Foram desenvolvidas para permitirem a sobreposição por encaixe e para terem resistências semelhantes nas duas direcções. A sobreposição mediante acoplagem sucessiva admite a possibilidade de continuidade de vigas contínuas de vários vãos e revela economia de armazenamento e transporte. Devido ao facto de possuírem elevada rigidez na direcção transversal estas madres têm a vantagem de dispensar a utilização de tirantes entre madres nas coberturas e à eliminação de vigas armadas (treliças nas fachadas). Por outro lado o facto do centro de corte se situar no eixo de simetria da secção transversal destas madres, estas não têm tendência a rodar, como acontece com outro tipo de madres.

No banzo inferior e nas almas, os perfis MadreMax têm furos espaçados de 50 mm, para utilização com parafusos M8 na secção $\Omega 100 \times 1.5$ e parafusos M10 nas restantes secções, $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$. Esta furação facilita o cruzamento entre os três tipos de madres e a sua fixação aos elementos estruturais, dispensando assim, suportes de fixação das madres (patilhas).

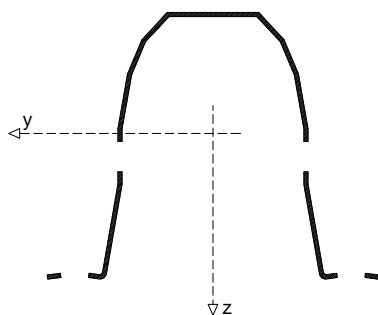


Figura 17 – Secção Transversal [10].

Após a optimização do perfil da madre foram determinadas as características geométricas para a secção furada, excepto o centro de corte e as constantes de torção e de empenamento que foram determinadas para a secção bruta.

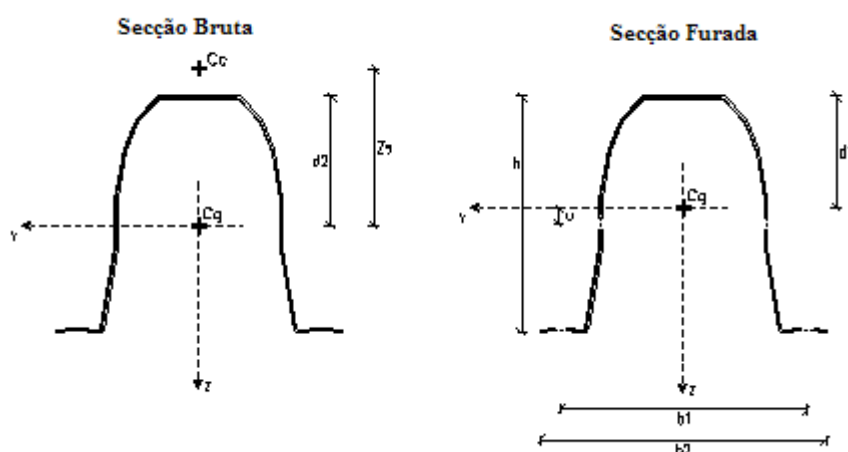


Figura 18 – Secção bruta e secção efectiva do perfil MadreMax [1].

Tabela 1 – Características geométricas da secção transversal bruta [1].

	b1 mm	t mm	G kg/m	h mm	b2 mm	d1 mm	d2 mm	z _s mm
Ω100x1.5	100	1.5	3.33	103.2	123.9	49.5	53.1	85.7
Ω150x1.5	150	1.5	4.65	145.8	179.0	68.2	72.9	123.8
Ω200x2.0	200	2.0	9.30	227.5	238.3	108.4	113.2	194.7

	A. bruta mm ²	A. furada mm ²	I _y mm ⁴	W _{pl,y} mm ³	W _{el,y,min} mm ³	i _y mm	A _{vz} mm ²
Ω100x1.5	441.7	381.3	524071	12826.0	9766.9	37.1	282.6
Ω150x1.5	617.9	545.6	1462829	25401.3	18830.3	51.8	410.4
Ω200x2.0	1237.6	1141.1	7302187	81781.2	61291.8	80.0	874.2

	I _z mm ⁴	W _{pl,z} mm ³	W _{el,z,min} mm ³	i _z mm	I _t mm ⁴	I _w mm ⁶
Ω100x1.5	382123	11240.2	6166.2	31.7	332.2	2.2730E+08
Ω150x1.5	1318815	25041.2	14738.1	49.2	464.3	1.1763E+09
Ω200x2.0	4937445	70732.2	41446.5	65.8	1650.1	1.0290E+10

	desenv. mm	A. pintar mm ² /m	φ Furos mm	parafuso desig.	u mm	classe da secção		
						My	Mz	N
Ω100x1.5	295.3	0.59	10.0	M8	2.8	4	4	4
Ω150x1.5	412.7	0.83	12.0	M10	6.3	4	4	4
Ω200x2.0	618.8	1.24	12.0	M10	6.6	4	4	4

Tabela 2 – Características geométricas da secção transversal efectiva [1].

	I _{eff,y} mm ⁴	W _{eff,y,min} mm ³	d. n. eff mm	I _{eff,z} mm ⁴	y _g mm	W _{eff,z,min} mm ³	A _{eff} mm ²	z _g mm	e _{N,y} mm
Ω100x1.5	524071	9766.9	44	324268	66.8	4851.9	278.43	48.5	1.0
Ω150x1.5	1462829	18830.3	89	931629	103.4	9006.9	310.19	63.6	4.6
Ω200x2.0	7302187	61291.8	132	3586035	137.0	26184.8	657.62	103.7	4.7

em que:

A. bruta	Área da secção transversal sem furos
A. furada	Área da secção transversal com furos
z _s	Posição do centro de corte
I _y e I _z	Momentos de inércia em relação ao eixo yy e ao eixo zz
W _{el,y,min}	Módulo de flexão elástico mínimo em relação do eixo yy
W _{el,z}	Módulo de flexão elástico em relação do eixo zz
W _{pl,y} e W _{pl,z}	Módulos de flexão plástico em relação do eixo yy e em relação do eixo zz
i _y e i _z	Raios de giração em relação do eixo yy e em relação do eixo zz
A _{vz}	Área resistente ao corte da secção transversal
I _t	Constante de torção
I _w	Constante de empenamento
C _g	Centro de Gravidade da Secção
C _c	Centro de Corte da Secção
I _{y,eff} e I _{z,eff}	Momentos de inércia efectivo em relação ao eixo yy e ao eixo zz
W _{eff,y,min} e W _{eff,z,min}	Módulos de flexão efectivo mínimo em relação do eixo yy e em relação do eixo zz
A _{eff}	Área da secção transversal efectiva

De acordo com Eurocódigo 3 as três secções são classificadas como sendo de classe 4 para momentos flectores e esforço axial como mostra na Tabela 1 e na Figura 19.



Figura 19 – Secções transversais efectivas [1].

A verificação da segurança à flexão foi realizada através das expressões do Eurocódigo 3, foi considerada a secção em regime elástico e não teve em conta o aumento de tensão de cedência resultante do processo de fabrico dos elementos de aço enformados a frio.

Na inexistência de encurvadura lateral e no caso de flexão simples a parte 1-1 do Eurocódigo 3 [5] estabelece as equações (4) para os valores de cálculo dos momentos elásticos resistentes segundo os eixos y e z em que γ_{M0} tem o valor de 1.0.

$$M_{eff,y,Rd} = W_{eff,y,min} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ e } M_{eff,z,Rd} = W_{eff,z,min} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4)$$

Quando existe flexão desviada a parte 1-3 do Eurocódigo 3 [2] estabelece a seguinte verificação, em que $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$ são os momentos actuantes em relação os eixos y e z:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{eff,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{eff,z,Rd}} \leq 1 \quad (5)$$

Com a ocorrência de encurvadura lateral, a resistência deve ser reduzida de forma a ter em conta este fenómeno de instabilidade. Assim, segundo a parte 1-1 do Eurocódigo 3 [5], o momento resistente à encurvadura lateral é dado pela equação (6):

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{eff,y,min} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6)$$

em que:

$$W_{eff,y,min} = \min(W_{eff,y,s}; W_{eff,y,t}) \quad (7)$$

Factor de redução do momento resistente:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ com } \chi_{LT} \leq 1 \quad (8)$$

$$\phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (9)$$

O Factor de imperfeição para a encurvadura lateral, α_{LT} , segundo a parte 1-3 do Eurocódigo 3 [2] é igual a 0.34.

Esbelteza normalizada para a encurvadura lateral:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} f_y}{M_{cr}}} \quad (10)$$

O momento crítico elástico à encurvadura lateral, M_{cr} , é dado pela expressão:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \sqrt{\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]} - [C_2 z_g - C_3 z_j] \right\} \quad (11)$$

É desnecessária a verificação da resistência à encurvadura lateral quando $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0.2$ ou $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0.04$.

Para a verificação da segurança à flexão foram criados ábacos que permitem o cálculo directo do valor da carga distribuída máxima para diferentes comprimentos, quer para a flexão simples quer para a flexão desviada, para as três secções transversais.

Ainda nesta fase, foi estudado o aumento de resistência provocado pela sobreposição de madres. Esta sobreposição pode ser colocada como reforço nos vãos extremos e na zona de apoio de forma a garantir a continuidade da viga.

Foi estudada uma viga contínua de 5 vãos, em que z representa o comprimento de sobreposição estudado, a é o comprimento de reforço e x_1 é a distância a que deve ser colocado o reforço. Esta viga é apenas representativa, pois os resultados obtidos podem ser usados para vigas contínuas com mais do que 5 vãos.

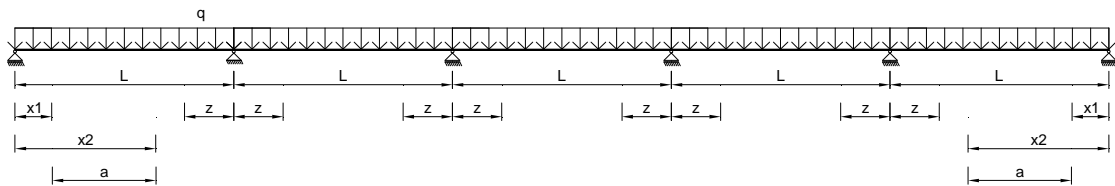


Figura 20 – Viga contínua de 5 vãos com sobreposição e reforço. [10]

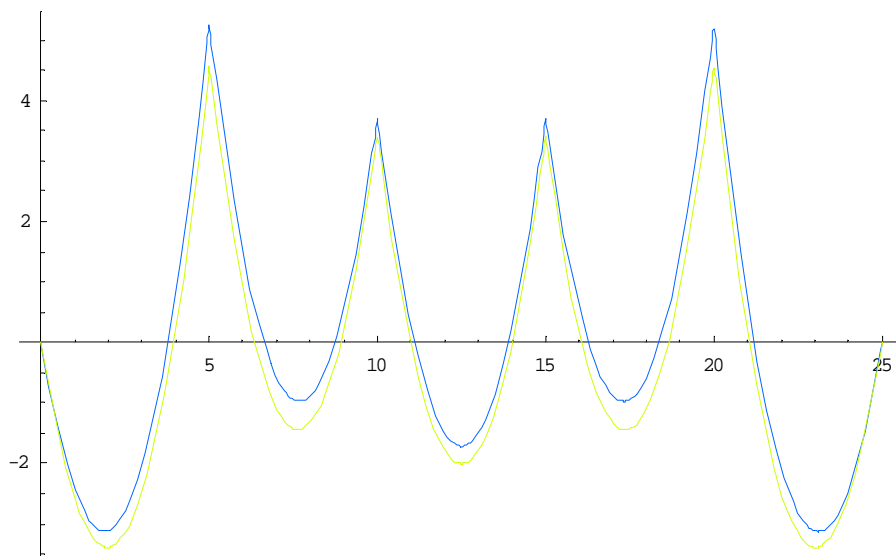


Figura 21 – Diagrama de momentos de uma viga contínua de 5 vãos. [10]

O efeito benéfico provocado pela sobreposição dá-se com o aumento da inércia que provoca um aumento dos momentos nos apoios e diminuição dos momentos no vão, aumentando ao mesmo tempo a resistência da secção transversal da madre. A sobreposição das madres garante também a transferência de momento flector de um vão para o outro, assegurando assim, a continuidade da viga.

A sobreposição na zona do apoio e na zona do vão provoca uma duplicação da rigidez e da resistência das secções transversais.

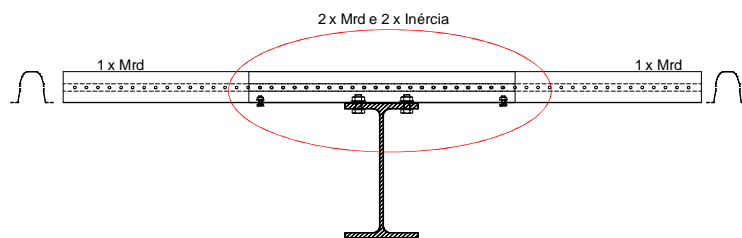


Figura 22 – Sobreposição no apoio. [11]

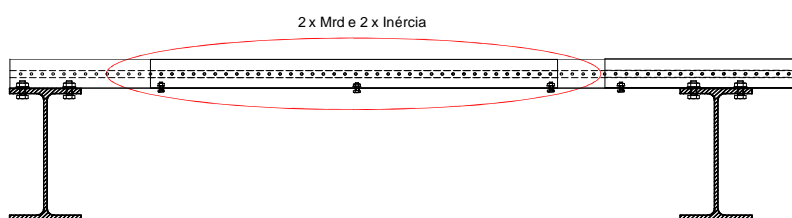


Figura 23 – Sobreposição no vão. [11]

Aplicando as sobreposições à viga continua de 5 vãos obtém-se o seguinte diagrama de momentos flectores:

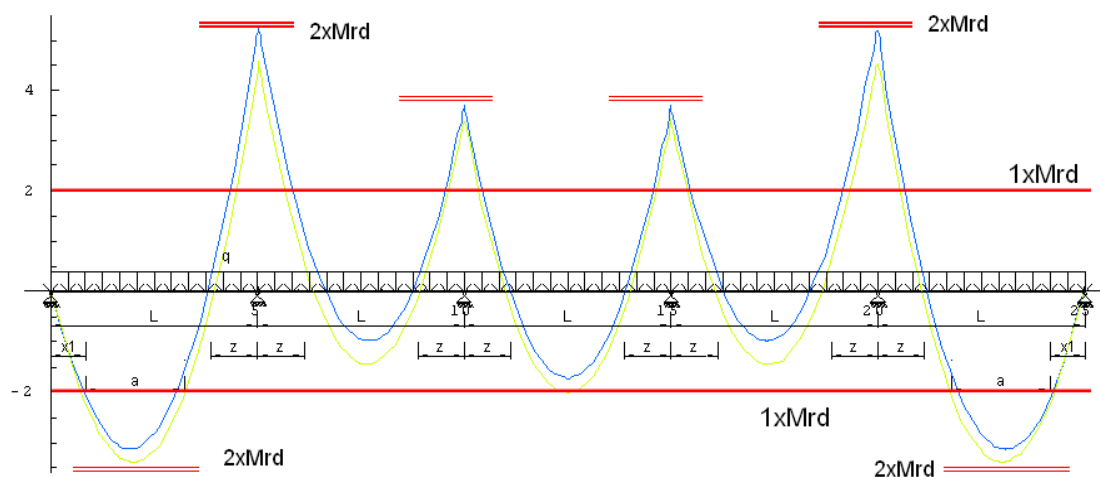


Figura 24 – Viga continua com 5 vãos. [11]

Tendo em conta estes reforços e as características geométricas foram realizadas tabelas de pré-dimensionamento de apoio aos projectistas, dando por encerrada esta primeira fase do estudo do sistema MadreMax.

É de salientar que Neste estudo foi considerado a análise aos estados limites últimos e utilizou o aço do tipo S320GD+Z/ZD (EN 10326 [12]).

Tabela 3 – Tabelas de pré-dimensionamento para a flexão simples e flexão desviada. [1]

Flexão simples

Ω 100x1.5

L [m]	z [m]	x1 [m]	x2 [m]	a [m]	$q_{z,m\acute{a}x}$ [kN/m]	$q_{y,m\acute{a}x}$ [kN/m]
4	0.55	0.83	2.33	1.51	3.24	2.05
5	0.65	1.01	2.93	1.92	2.08	1.31
6	0.80	1.22	3.52	2.29	1.44	0.91

Ω 150x1.5

L [m]	z [m]	x1 [m]	x2 [m]	a [m]	$q_{z,m\acute{a}x}$ [kN/m]	$q_{y,m\acute{a}x}$ [kN/m]
5	0.65	1.01	2.93	1.92	4.02	3.15
6	0.80	1.22	3.52	2.29	2.79	2.18
7	0.90	1.42	4.11	2.69	2.05	1.60
8	1.05	1.63	4.68	3.05	1.57	1.23
9	1.05	1.82	5.28	3.46	1.25	0.98

Flexão desviada

Ω 100x1.5

L [m]	z [m]	x1 [m]	x2 [m]	a [m]	$q_{y,máx}$ [kN/m]
4	0.55	0.83	2.33	1.51	$q_{y,máx} = -0.633 \cdot q_z + 2.05$
5	0.65	1.01	2.93	1.92	$q_{y,máx} = -0.630 \cdot q_z + 1.31$
6	0.80	1.22	3.52	2.29	$q_{y,máx} = -0.632 \cdot q_z + 0.91$

Ω 150x1.5

L [m]	z [m]	x1 [m]	x2 [m]	a [m]	$q_{y,máx}$ [kN/m]
5	0.65	1.01	2.93	1.92	$q_{y,máx} = -0.784 \cdot q_z + 3.15$
6	0.80	1.22	3.52	2.29	$q_{y,máx} = -0.781 \cdot q_z + 2.18$
7	0.90	1.42	4.11	2.69	$q_{y,máx} = -0.780 \cdot q_z + 1.60$
8	1.05	1.63	4.68	3.05	$q_{y,máx} = -0.783 \cdot q_z + 1.23$
9	1.05	1.82	5.28	3.46	$q_{y,máx} = -0.784 \cdot q_z + 0.98$

Relativamente à segunda fase deste estudo foi elaborado um programa de cálculo para o dimensionamento das MadreMax. Este programa permite a introdução da inclinação das vertentes, a introdução dos valores característicos das cargas a considerar, ou então, a colocação dos valores de cálculo das acções para os estados limites últimos e para os estados limites de serviço.



Figura 25 – Programa de cálculo das MadreMax. [9]

O programa de cálculo não considera fenómenos de encurvadura e apresenta um relatório detalhado da verificação da segurança das madres aos estados limites últimos e aos estados limites de serviço.

Por fim, a terceira fase, na qual se insere esta dissertação, diz respeito à realização de ensaios experimentais [11] para avaliação da resistência das madres com particular destaque á ocorrência ou não de encurvadura dos banzos livres. A possível ocorrência de encurvadura dos banzos livres será avaliada, também, através de modelação numérica.

2.3.2. Processo de Fabrico

Como já foi referido anteriormente, o processo de fabrico de elementos de aço enformados a frio produz alterações nas propriedades mecânicas do aço, nomeadamente devidas ao raio de dobragem, à espessura da chapa e ao tipo de aço. A resistência da secção é melhorada através do endurecimento que ocorre no processo de dobragem das chapas.

O processo de fabrico dos elementos de aço enformados a frio é caracterizado por dois métodos: a laminagem a frio e a dobragem. A laminagem a frio é utilizada na produção de grandes quantidades e em que a chapa é dobrada à medida que vai passando por uma série de rolos na perfiladora (ver Figura 28). A dobragem ou quinagem é utilizada na produção de pequenas quantidades e para elementos de comprimento inferior a 6 metros, em que a chapa é comprimida entre uma superfície convexa e uma superfície côncava. [3]

O método mais utilizado no fabrico de elementos de aço enformados a frio é o da laminagem a frio. Este método oferece boas oportunidades para variar a forma do perfil, sendo fácil a fabricação de perfis óptimos com propriedades adequadas à sua resistência.

A tensão de cedência, a tensão de rotura e a ductilidade são influenciadas localmente pelo raio de curvatura, pela espessura da chapa, pelo tipo de aço e pelo processo de fabrico dos elementos de aço enformados a frio. A tensão de cedência média da secção depende do número de cantos e da largura dos elementos [13].

No processo de fabrico do sistema MadreMax é utilizado o método da laminagem a frio e é caracterizado pelo seguinte procedimento:

- A chapa de aço do tipo S320GD+Z/ZD (EN 10326 [12]) em bobine é colocada num desenrolador.



Figura 26 – Imagem do desenrolador com a bobine

- A chapa é introduzida num “punção” que, segundo uma matriz, realiza a furação da chapa.

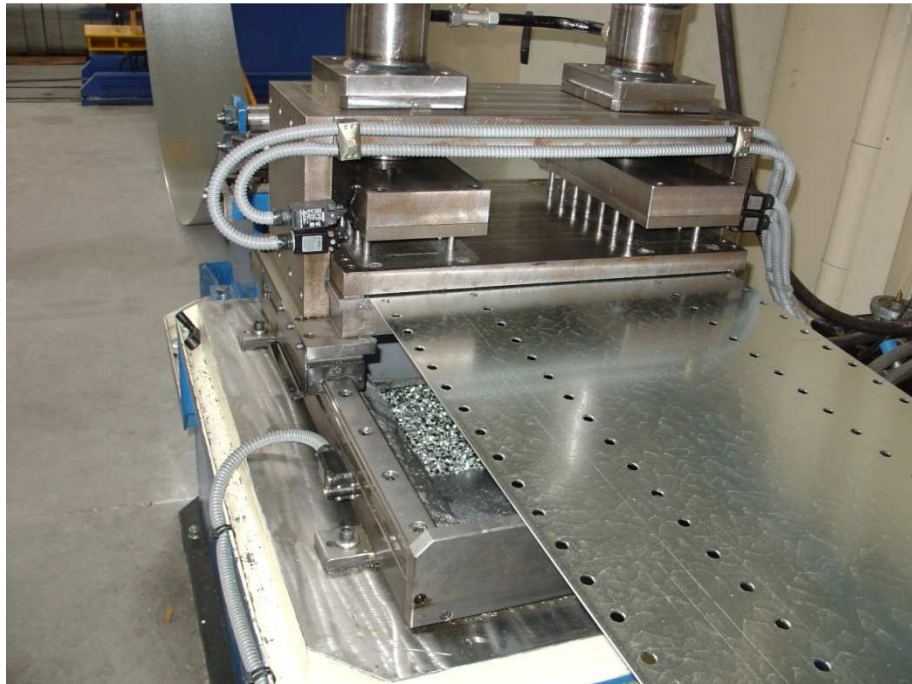


Figura 27 – Imagem do punção de furação da chapa

- Após furação da chapa, esta é introduzida na perfiladora. A chapa é dobrada à medida que vai passando por uma série de rolos. O número e a geometria dos rolos dependem da secção transversal do perfil MadreMax.



Figura 28 – Imagem da perfiladora

- Por fim, a chapa já com a configuração pretendida é cortada com a medida, inicialmente introduzida, por um sistema de guilhotina.



Figura 29 – Imagem do corte da chapa por um sistema de guilhotina

- O perfil MadreMax é colocado numa “esteira” para se proceder ao seu embalamento.



Figura 30 – Imagem do embalamento na esteira

- O embalamento realiza-se por acoplagem sucessiva de madres.



Figura 31 – Armazenamento das madres

CAPÍTULO 3

ANÁLISE NUMÉRICA

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 Considerações gerais

Este capítulo é dedicado á descrição dos programas que serviram de base para a análise numérica de perfis enformados a frio e à descrição do modelo numérico adoptado para simular o seu comportamento.

A análise numérica do comportamento de madres enformadas a frio pode ser realizada através de programas de cálculo de elementos finitos. Os programas utilizados para efectuar o estudo numérico foram o GID e o SAFIR. O programa GID, desenvolvido pelo CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia Barcelona, Espanha), utilizou-se para a obtenção da malha de elementos finitos e o programa SAFIR, desenvolvido na Universidade de Liège na Bélgica, utilizou-se para efectuar os estudos numéricos.

Dos vários estudos numéricos realizados por vários autores com o programa SAFIR obtiveram-se resultados satisfatórios quando comparados com os resultados experimentais, bem como, com os resultados obtidos com outros programas de cálculo.

3.2 O programa GID



Figura 32 – Imagem do programa GID

3.2.1. Descrição geral

O programa GID é um programa que serve para a modelação geométrica e para a entrada de dados em diversos programas de simulação numérica. Foi desenvolvido pelo CIMNE tendo em conta as necessidades do utilizador e a simplicidade, a velocidade, a eficácia e a exactidão que o utilizador exige na preparação dos dados de entrada para os programas de simulação numérica.

O GID é uma ferramenta importante para ser usada num ambiente de vários utilizadores nas universidades, em centros de pesquisa e em empresas que tenham como base o desenvolvimento e aplicação em diferentes programas de simulação numérica.

O GID permite gerar toda a informação necessária na análise de problemas utilizando métodos numéricos, desde malhas estruturais e não estruturais, condições de apoio e de carregamento, tipo de materiais, visualização de resultados, etc.



Figura 33 – Capacidades do programa GID [14]

Este programa pode ser definido pelo utilizador para ler e escrever dados num número ilimitado de formatos. Os formatos de entrada e de saída do GID podem ser personalizados e são compatíveis com qualquer software pré-definido. Os diferentes menus e a visualização de resultados podem ser configurados tendo em conta as necessidades do utilizador.

Reduz o tempo e o custo associados à análise numérica através do elevado desempenho na entrada de dados, reduz o tempo de aprendizagem, permite uma relação fácil com códigos de software e sistemas CAD.

Na Engenharia Estrutural é utilizado para gerar dados e para visualizar resultados de problemas lineares e não lineares que usam o método dos elementos finitos.

3.2.2. A Malha

Gerar uma malha é um processo realizado através da definição da geometria. As condições de apoio e de carregamento, bem como os materiais atribuídos à geometria podem ser transferidos aos nós e aos elementos da malha.

O programa GID tem uma série de opções para a geração de malhas, podem ser malhas estruturais, malhas semi-estruturais e malhas não estruturais.

A obtenção da malha pode ser realizada depois de todos os dados e configurações estarem atribuídos à geometria. O GID permite a geração de malhas de grandes dimensões de uma maneira fácil e eficiente e tem a capacidade de se poder visualizar várias malhas antes de seleccionar a desejada.

A exportação dos dados da malha do GID pode ser em vários formatos:

- Formato de GID;
- NASTRAN, ANSYS, SAFIR, Abaqus (.bas);
- Malha definida pelo utilizador (STL, VRML, DXF, UNV, POV-Ray, ect)

3.3 O programa SAFIR

3.3.1. Descrição geral

O programa SAFIR é um programa de elementos finitos usado principalmente em simulações numéricas, foi desenvolvido pela Universidade de Liege especialmente para o estudo de estruturas em caso de incêndio. É utilizado para a análise de estruturas à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas e em estruturas planas e tridimensionais.

Como se trata de um programa de elementos finitos, acomoda vários elementos para diferentes simulações, procedimentos de cálculo e vários modelos de materiais para incorporar no comportamento. Os elementos podem ser elementos sólidos 2D, elementos sólidos 3D, elementos viga, elementos cascas e elementos barra [16].

A maioria dos programas de cálculo são capazes de resolver problemas materialmente não lineares, o programa SAFIR é um programa de elementos finitos baseado no método dos deslocamentos [17].

3.3.2. Elementos de casca

O elemento finito utilizado neste trabalho foi o elemento de casca. Através da Figura 34 pode-se verificar que os nós nos elementos de casca são ordenados em 1, 2, 3, 4 e que a, b, c, d são os pontos médios das arestas do elemento de casca. A intersecção entre a-c e b-d chama-se o ponto o que corresponde o centro do eixo de coordenadas x, y e z.

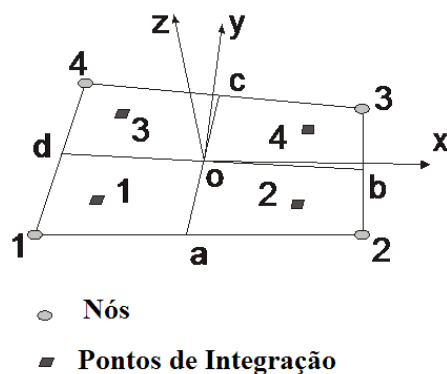


Figura 34 – Definição da geometria e dos eixos locais [18]

Existem, também, 4 pontos de integração numa superfície de um elemento de casca. Em cada direcção, a integração é através do método de Gauss. O número de integrações na espessura pode ser escolhido pelo utilizador, podendo ser de 2 a 10.

O elemento de casca no SAFIR é programado para ser usado com grandes deslocamentos no estado plano de tensão. Este elemento finito, primeiro foi introduzido para materiais elásticos e só depois para materiais elásto-plásticos [19].

3.4 O modelo numérico

3.4.1. Considerações gerais

A definição de um modelo numérico para simular e caracterizar o comportamento de madres enformadas a frio, quando solicitadas por determinada acção, é de extrema importância e tem de obedecer a critérios, mediante os objectivos a que se propõe o estudo.

Sendo objecto deste trabalho a análise numérica do comportamento de madres enformadas a frio, o modelo a adoptar terá sempre que dar um tratamento cuidado, nomeadamente à encurvadura

dos seus banzos livres e ao comportamento dos reforços utilizados para aumentar a capacidade resistente das mesmas.

Com o objectivo final de desenvolver um modelo numérico que represente o comportamento das madres enformadas a frio, MadreMax, foi necessária uma análise de sensibilidade. Esta análise teve como base de comparação os resultados dos ensaios experimentais realizados às madres enformadas a frio, MadreMax.

3.4.2. Análise de sensibilidade

No que se segue são apresentados sumariamente os principais parâmetros que se teve em consideração para chegar ao modelo numérico final.

Analizou-se a influência da existência ou não de furos no modelo numérico, a influência da imposição de uma imperfeição inicial ao modelo numérico pois nos ensaios experimentais verificou-se que as madres enformadas a frio, MadreMax, possuíam esta imperfeição. Nesta análise de sensibilidade teve-se em consideração a forma de aplicação das cargas, bem como as restrições nos apoios. Um dos aspectos importantes foi a dimensão da malha do modelo numérico, isto é, determinação das zonas onde a malha deverá ser mais refinada ou não. Tornou-se, também, necessário definir a precisão dos resultados, bem como, o tempo da simulação numérica.

As madres enformadas a frio, MadreMax, têm furos espaçados de 50 mm no banzo inferior e nas almas, por isso optou-se por fazer um modelo numérico com furos e outro modelo numérico sem furos, como se mostra na Figura 35.

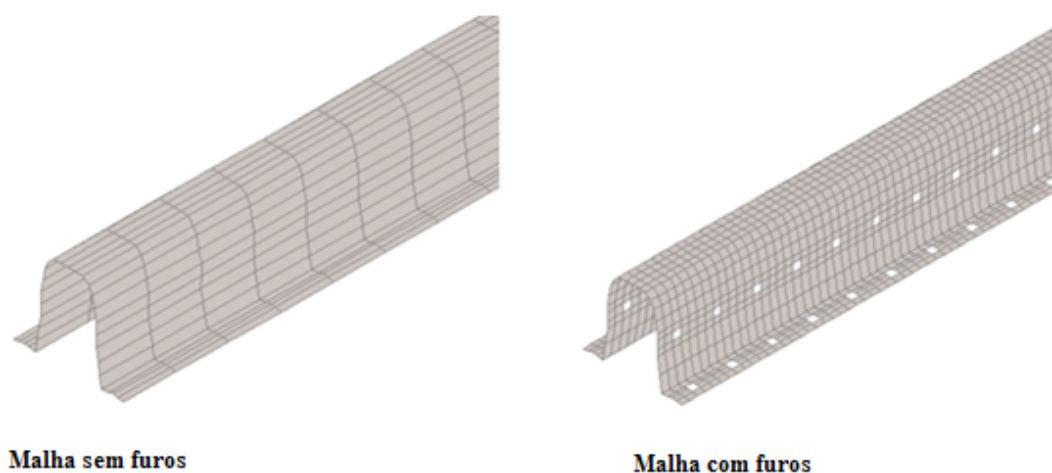


Figura 35 – Imagem da malha com furos e sem furos

Para avaliar a influência da existência ou não de furos no modelo numérico, foram realizadas 3 simulações numéricas com uma viga com malha com furos e com uma viga com malha sem furos com condições de aplicação de carga e condições de apoios iguais. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4, em que:

- Simulação 1: Ensaio de flexão simples à secção MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$ – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes sem restrições na aplicação das cargas;
- Simulação 2: Ensaio de flexão simples à secção MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$ – simplesmente apoiado, sujeita a cargas ascendentes sem restrições na aplicação das cargas;
- Simulação 3: Ensaio de flexão simples à secção MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$ – simplesmente apoiado, sujeita a cargas ascendentes com restrições na aplicação das cargas segundo a direcção yy (ver Figura 38).

Tabela 4 – Tabela de resultados da viga com malha com furos vs viga com malha sem furos

	Malha com furos		Malha sem furos		Erro (%)
	Carga Ultima ($\times 10^{-2}$ kN)	Tempo de Cálculo	Carga Ultima ($\times 10^{-2}$ kN)	Tempo de Cálculo	
Simulação 1	277,04	3h45m	289,35	0h30m	4,44
Simulação 2	131,66	3h45m	130,36	0h30m	-0,98
Simulação 3	250,08	3h45m	250,14	0h30m	0,02

O modelo numérico com furos utiliza uma malha com imensos elementos tornando a sua simulação numérica extremamente demorada comparativamente ao modelo numérico sem furos. Como os resultados obtidos para ambos os modelos são semelhantes, por isso decidiu-se considerar o modelo sem furos, uma vez que a existência dos furos não é relevante nos resultados.

Existiu a necessidade de verificar a influência da imposição de uma imperfeição inicial ao modelo numérico pois nos ensaios experimentais verificou-se que as madres enformadas a frio, MadreMax, possuíam esta imperfeição. Para isso, preparou-se uma viga sem imperfeição inicial e outra com uma imperfeição inicial de forma sinusoidal dada pela equação (12) imposta no eixo yy (ver Figura 38) [20].

$$y(x) = \frac{L}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (12)$$

em que L é o comprimento da viga e L/1000 é a tolerância máxima pretendida.

A influência da imposição de uma imperfeição inicial ao modelo numérico, foi avaliada através da realização 3 simulações numéricas com uma viga com imperfeição inicial e com uma viga sem imperfeição inicial, com condições de aplicação de carga e condições de apoios iguais. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5, em que:

- Simulação 1: Ensaio de flexão simples à secção MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$ – com dois vãos e em continuidade sem recurso a reforços na zona do apoio central, sujeita a cargas descendentes com precisão de 1×10^{-5} (ver Figura 42);
- Simulação 2: Ensaio de flexão simples à secção MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$ – com dois vãos e em continuidade sem recurso a reforços na zona do apoio central, sujeita a cargas descendentes com precisão de 1×10^{-2} (ver Figura 42);
- Simulação 3: Ensaio de flexão simples à secção MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$ – com dois vãos e em continuidade com recurso ao reforço da zona sobre o apoio central através da sobreposição de MadreMax, sujeita a cargas descendentes (ver Figura 44);

Tabela 5 – Tabela de resultados da viga com imperfeição inicial vs viga sem imperfeição inicial

	Viga com imperfeição inicial	Viga sem imperfeição inicial	Erro (%)
	Carga Ultima ($\times 10^{-1}$ kN)	Carga Ultima ($\times 10^{-1}$ kN)	
Simulação 1	43,38	45,50	4,90
Simulação 2	45,00	50,00	11,11
Simulação 3	22,06	24,89	12,83

Devido a estes resultados e também, ao facto de se ter verificado nos ensaios experimentais que as vigas possuem imperfeição inicial, adoptou-se um modelo numérico sempre com uma imperfeição inicial de forma sinusoidal dada pela equação (12), imposta no eixo yy (ver Figura 38) [20].

A maneira de aplicação da carga é mais um dos aspectos que se teve em consideração no modelo numérico, pois verificou-se que com a aplicação de uma carga pontual a viga deforma-se apenas no local de aplicação. Por isso a aplicação da carga realizou-se de forma distribuída.

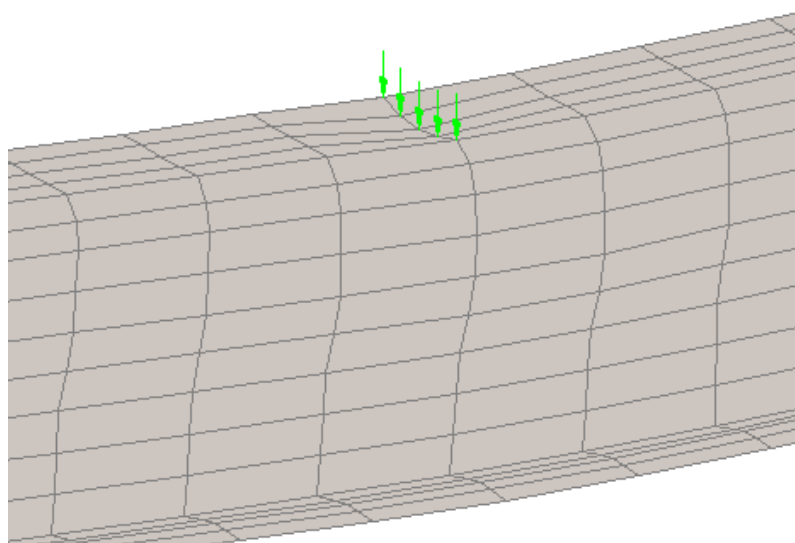


Figura 36 – Imagem da viga deformada localmente devido a forças concentradas

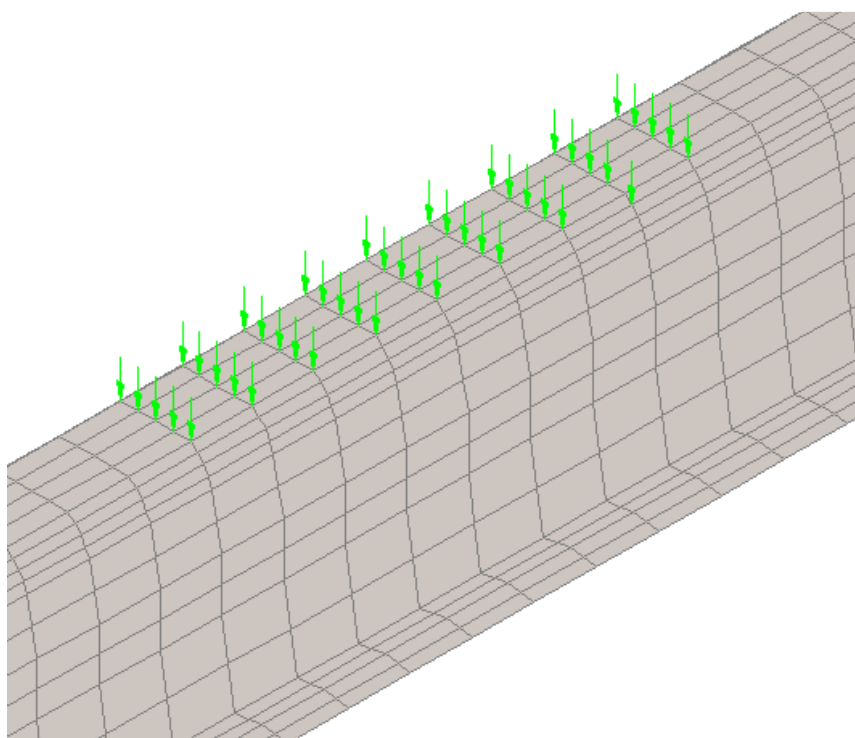


Figura 37 – Imagem da viga com carga distribuída

Na zona de aplicação de cargas e na zona dos apoios, a malha foi “refinada” de forma a obterem-se elementos pequenos nas posições de momentos máximos e mínimos, de modo a que os pontos de Gauss pudessem captar esses momentos. A dimensão da malha teve em consideração a

posição dos furos da madre enformada a frio, MadreMax, embora o modelo numérico não possua os furos.

A Tabela 6 retrata os resultados obtidos para três simulações, uma simulação com uma viga com malha gerada inicialmente tendo em conta a posição dos furos, uma simulação com uma viga com malha apenas “refinada” na zona de aplicação das cargas e nos apoios, outra simulação de uma malha toda “refinada” e um ensaio experimental a uma viga nas mesmas condições de carga e apoios. Em que:

- Simulação 1: Ensaio de flexão simples à secção MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$ – com dois vãos e em continuidade sem recurso a reforços na zona do apoio central, sujeita a cargas descendentes (ver Figura 42);

Tabela 6 – Tabela de resultados de ambos os modelos vs ensaio experimental equivalente

	Carga Última ($\times 10^{-1}$ kN)			
	Malha gerada inicialmente	Malha "refinada" na zona de aplicação da carga e apoios	Malha totalmente "refinada"	Ensaio Experimental equivalente
Simulação	23,08	30,79	43,38	44,5

Através dos resultados obtidos optou-se por utilizar a malha totalmente refinada, e assim os resultados obtidos corresponderem o mais próximo possível aos ensaios experimentais.

Os apoios foram simulados com restrições nos nós de localização dos furos (local onde é colocado os parafusos nos ensaios experimentais) bem como nos nós da malha que englobem os apoios utilizados nos ensaios experimentais (depende de ensaio para ensaio). No caso de um apoio simples, os nós dos furos foram restringidos os deslocamentos em yy e em zz e os restantes nós dos apoios foi restringido deslocamento em zz (ver Figura 38). No caso de um apoio duplo, os nós dos furos foram restringidos os deslocamentos em xx, yy e zz e os restantes nós dos apoios foi restringido deslocamento em zz (ver Figura 38).

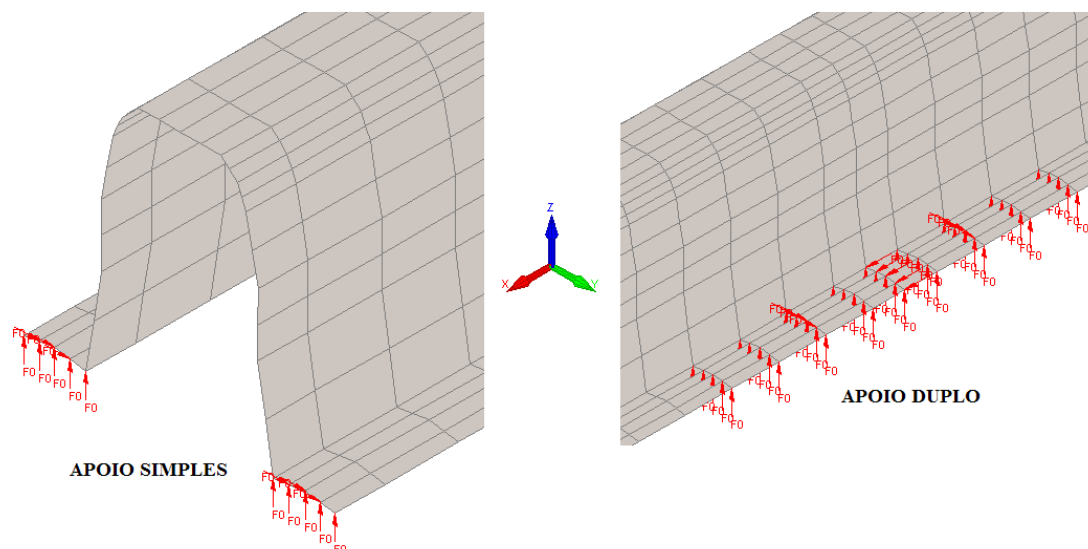


Figura 38 – Imagem de um apoio duplo e um apoio simples

O valor admitido, após várias simulações numéricas, para a precisão de resultados foi de 1×10^{-6} , isto porque quanto menor era a precisão pior eram os resultados. Relativamente ao tempo de simulação numérica adoptou-se um tempo máximo de 10000 com um passo de 1.2.

O modelo numérico adoptado não considera tensões residuais. É um modelo que não possui os furos das madres enformadas a frio, MadreMax, com uma imperfeição inicial de forma sinusoidal dada pela equação 12, imposta no eixo yy (ver Figura 38) [20]. Utiliza uma malha estrutural de 4 lados que é mais refinada na zona de aplicação das cargas e na zona dos apoios.

CAPÍTULO 4

ESTUDO PARAMÉTRICO

CAPÍTULO 4 – ESTUDO PARAMÉTRICO

4.1. Casos de Estudo

Os ensaios numéricos falados ao longo desta dissertação encontram-se inseridos Fase III do estudo desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, anteriormente mencionado. Tiveram como base os ensaios experimentais realizados às madres enformadas a frio, MadreMax, realizados no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no LabEst – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural e no LERF – Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. [20] e [21]

Foram estudadas três secções transversais das madres enformadas a frio, MadreMax, sendo elas: $\Omega 100 \times 1.5$; $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$. Foram realizados ensaios numéricos distintos para cada uma destas secções transversais.

Os ensaios numéricos realizados à secção transversal $\Omega 100 \times 1.5$ foram os seguintes:

- Ensaio 1 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes;
- Ensaio 2 – Ensaio de flexão simples – com dois vãos e em continuidade sem recurso a reforços na zona do apoio central, sujeita a cargas descendentes;
- Ensaio 3 – Ensaio de flexão simples – com dois vãos e em continuidade com recurso ao reforço da zona sobre o apoio central através da sobreposição de MadreMax, sujeita a cargas descendentes.

Os ensaios numéricos realizados à secção transversal $\Omega 150 \times 1.5$ foram os seguintes:

- Ensaio 4 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes;
- Ensaio 5 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada numa das extremidades e simplesmente apoiada noutra, com reforço por sobreposição na extremidade encastrada, sujeita a cargas descendentes;
- Ensaio 6 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada em ambas as extremidades, com reforço por sobreposição em ambas as extremidades, sujeita a cargas descendentes.

Os ensaios numéricos realizados à secção transversal $\Omega 200 \times 2.0$ foram os seguintes:

- Ensaio 7 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes;

- Ensaio 8 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada numa das extremidades e livre na outra, sujeita a cargas descendentes.

4.1.1. Ensaios numéricos à secção transversal $\Omega 100 \times 1.5$

Foram realizados três ensaios numéricos à secção $\Omega 100 \times 1.5$, todos eles à flexão simples. De seguida apresentam-se as simulações numéricas realizadas, de forma pormenorizada.

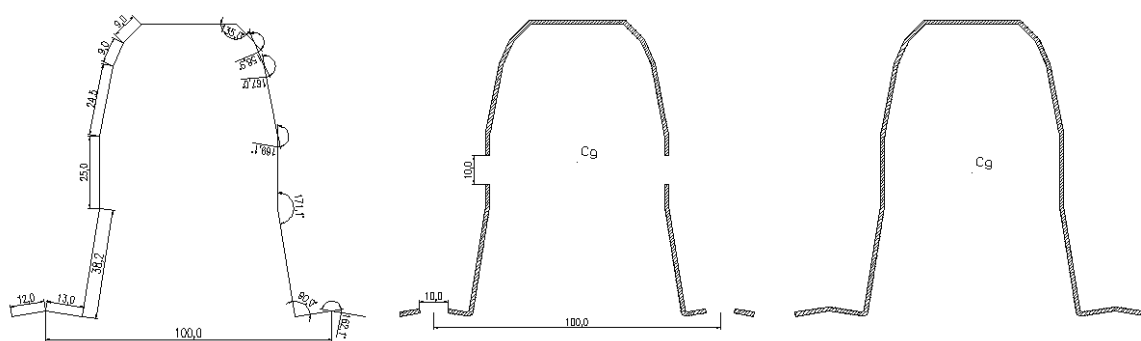


Figura 39 – Caracterização geométrica da secção $\Omega 100 \times 1.5$ [9]

4.1.1.1. Ensaio 1

Ensaio de flexão simples à MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$, com a madre simplesmente apoiada, com um comprimento de 2950mm e sujeita a cargas descendentes, segundo a Figura 40.

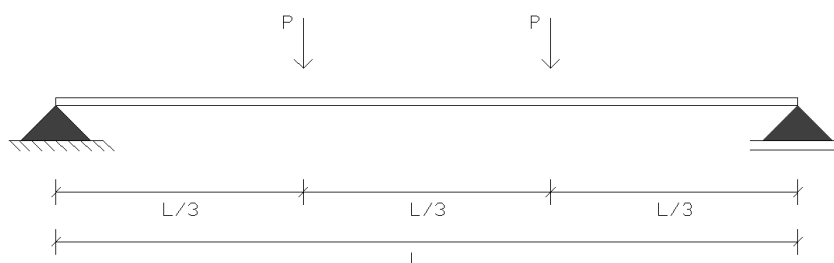


Figura 40 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 1, Ensaio 4 e Ensaio 7.

O carregamento localiza-se a um terço do vão através de duas forças pontuais distribuídas na direcção yy. O apoio duplo foi simulado restringindo o deslocamento em xx, yy e zz nos nós de localização dos parafusos e no apoio simples foi restringido o deslocamento em yy e em zz (ver Figura 41).

A tensão de cedência do material, utilizada nesta simulação numérica, foi de 360 MPa. Este valor para a tensão de cedência foi obtido através de vários ensaios de tracção realizados em provetes extraídos da chapa utilizada no fabrico das madres ensaiadas.

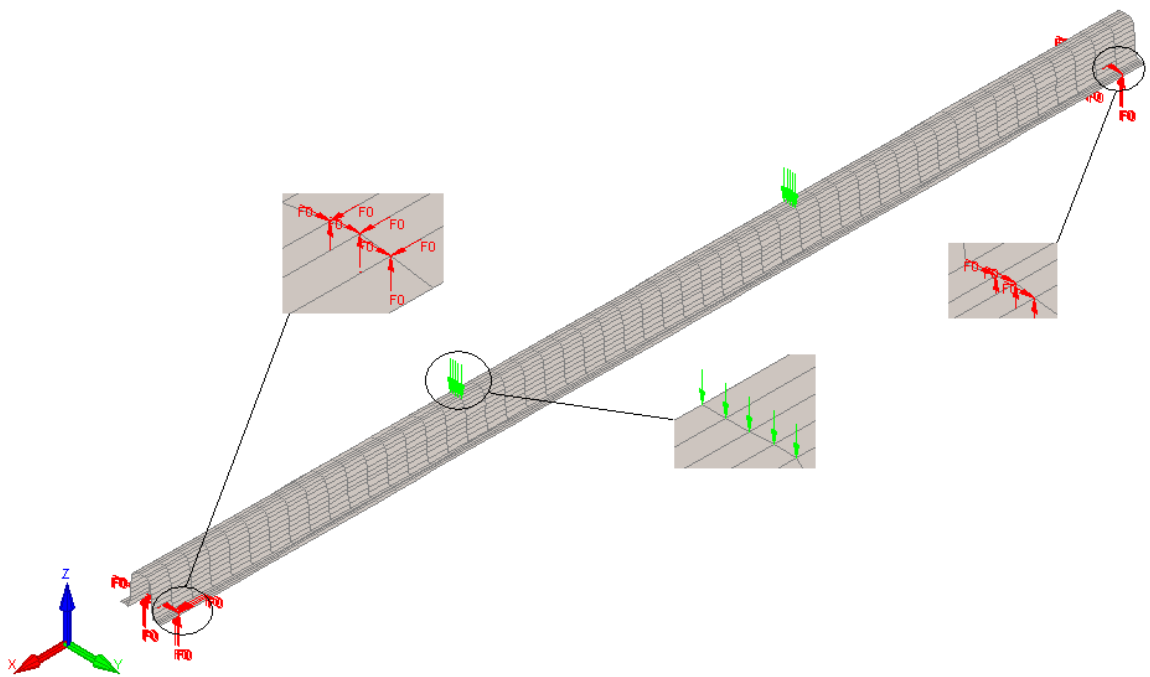


Figura 41 – Ensaio de flexão simples $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.

4.1.1.2. Ensaio 2

Ensaio de flexão simples à MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$ em continuidade com dois vãos, com um comprimento total de madre de 7750mm e sujeita a cargas descendentes, segundo a Figura 42.

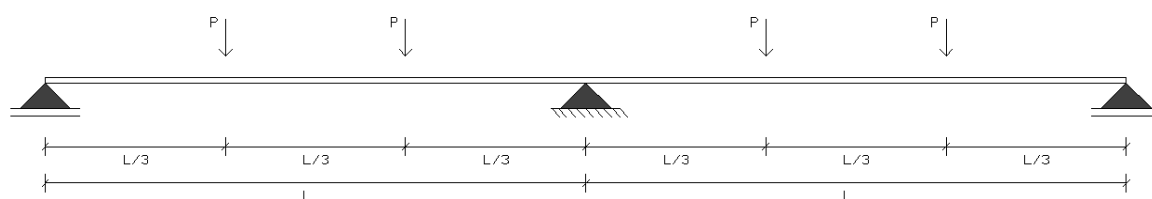


Figura 42 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 2.

O carregamento localiza-se a um terço do vão através de duas forças pontuais distribuídas na direcção yy e xx nos nós da malha.

O apoio simples foi simulado restringindo o deslocamento em yy e zz nos nós de localização dos parafusos e nos restantes nós foi restringido o deslocamento em zz. O apoio duplo foi simulado restringindo o deslocamento em xx, yy e zz nos nós de localização dos parafusos, os restantes nós dos apoios foi restringido deslocamento em zz e nos nós centrais do apoio foi restringido deslocamento em zz e xx (ver Figura 43).

A tensão de cedência do material, utilizada nesta simulação numérica, foi de 337.3 MPa. Este valor para a tensão de cedência foi obtido através de vários ensaios de tracção realizados em provetes extraídos da chapa utilizada no fabrico das madres ensaiadas.

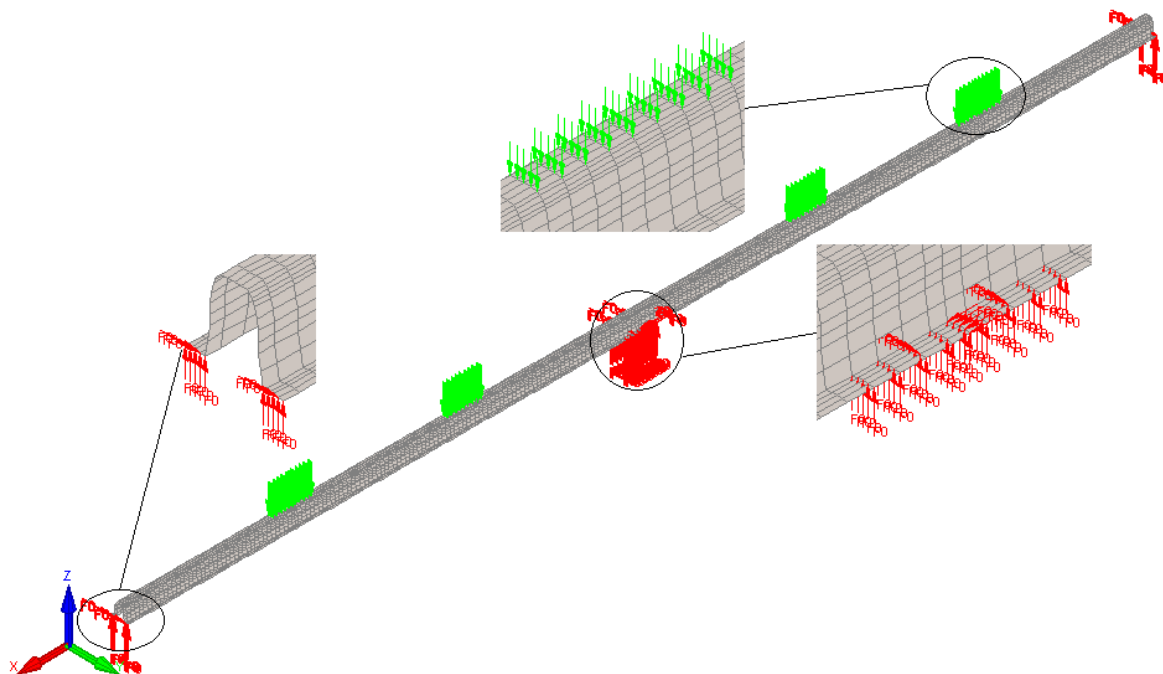


Figura 43 – Ensaio de flexão simples $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 2.

4.1.1.3. Ensaio 3

Ensaio de flexão simples à MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$ em continuidade com dois vãos, com um comprimento total de madre de 7750mm e sujeita a cargas descendentes, segundo a Figura 44. Com uma sobreposição de 1100mm de comprimento no apoio central.

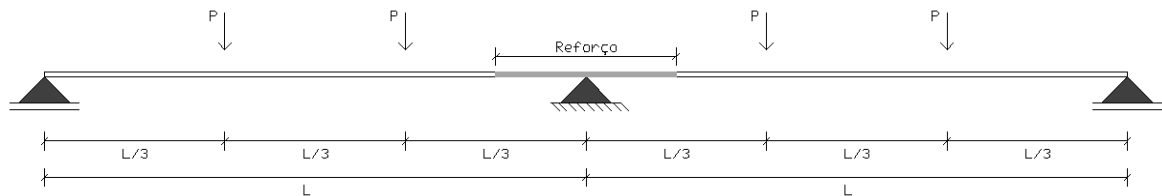


Figura 44 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 3.

O carregamento localiza-se a um terço do vão através de duas forças pontuais distribuídas na direcção yy e xx nos nós da malha.

O apoio simples foi simulado restringindo o deslocamento em yy e zz nos nós de localização dos parafusos e nos restantes nós foi restringido o deslocamento em zz . O apoio duplo foi simulado restringindo o deslocamento em xx , yy e zz nos nós de localização dos parafusos, os restantes nós dos apoios foi restringido deslocamento em zz e nos nós centrais do apoio foi restringido deslocamento em zz e xx (ver Figura 45).

A tensão de cedência do material, utilizada nesta simulação numérica, foi de 337.3 MPa. Este valor para a tensão de cedência foi obtido através de vários ensaios de tracção realizados em provetes extraídos da chapa utilizada no fabrico das madres ensaiadas.

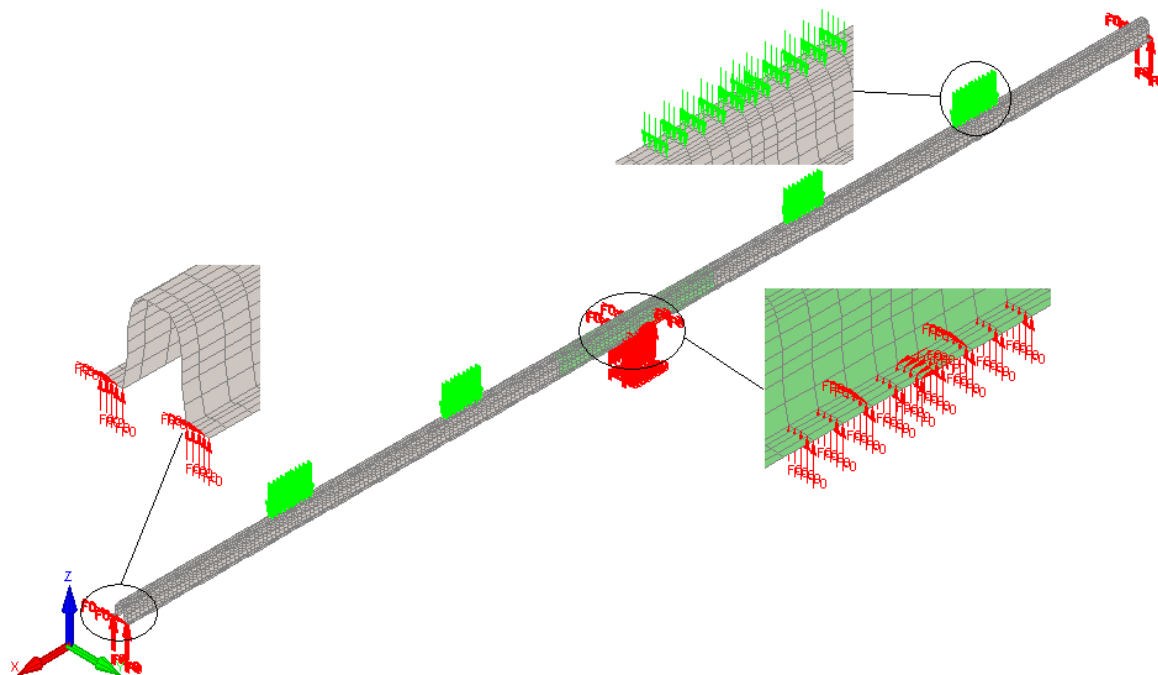


Figura 45 – Ensaio de flexão simples $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 3.

4.1.2. Ensaio numérico à secção transversal $\Omega 150 \times 1.5$

Foram realizados três ensaios numéricos à secção $\Omega 150 \times 1.5$, todos eles à flexão simples. De seguida apresentam-se as simulações numéricas realizadas, de forma pormenorizada.

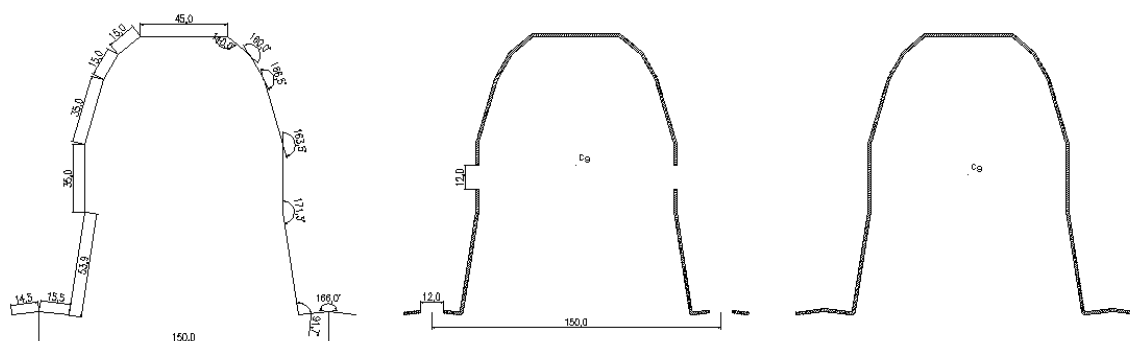


Figura 46 – Caracterização geométrica da secção $\Omega 150 \times 1.5$ [9]

4.1.2.1. Ensaio 4

Ensaio de flexão simples à MadreMax $\Omega 150 \times 1.5$, com a madre simplesmente apoiada, com um comprimento de 7500mm e sujeita a cargas descendentes, segundo a Figura 40.

O carregamento localiza-se a um terço do vão através de duas forças pontuais distribuídas na direcção yy e xx nos nós da malha. O apoio duplo foi simulado restringindo o deslocamento em xx, yy e zz nos nós de localização dos parafusos e o no apoio simples foi restringido o deslocamento em yy e em zz. Nos restantes nós de apoio foi restringido o deslocamento em zz (ver Figura 47).

A tensão de cedência do material, utilizada nesta simulação numérica, foi de 320 MPa. Este é o valor da tensão de cedência para o aço do tipo S320GD+Z/ZD (segundo a norma EN 10326 [12]). Este ensaio não foi testado experimentalmente, por isso é que foi usada esta tensão de cedência.

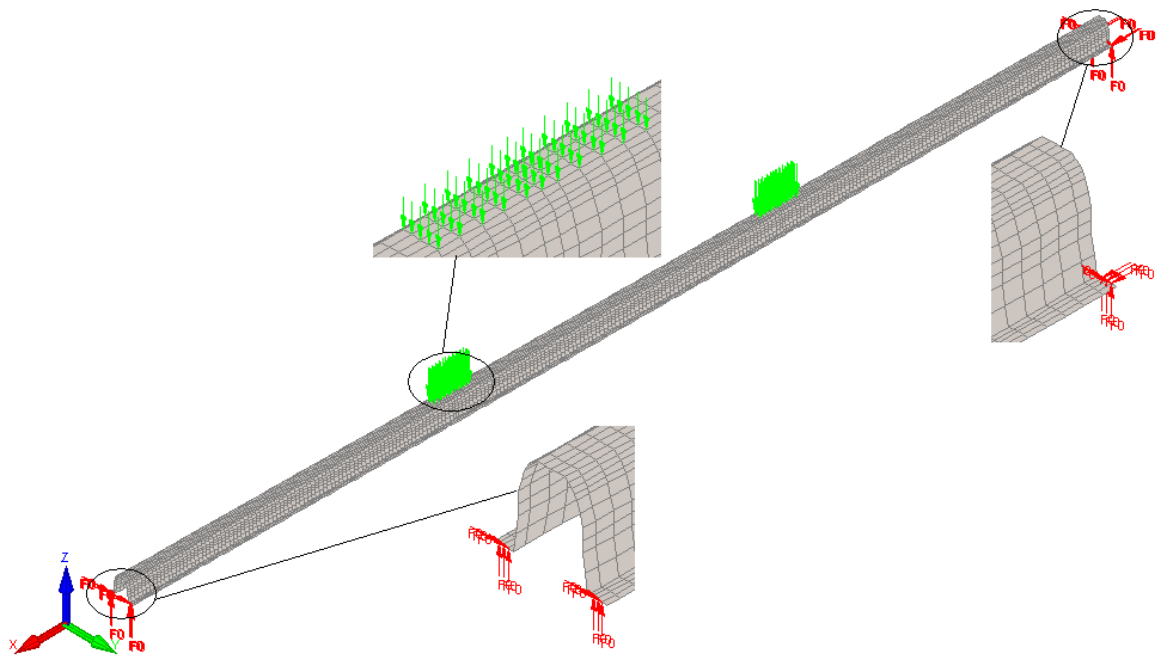


Figura 47 – Ensaio de flexão simples $\Omega 150 \times 1.5$ – Ensaio 4.

4.1.2.2. Ensaio 5

Ensaio de flexão simples à MadreMax $\Omega 150 \times 1.5$, com a madre encastrada numa das extremidade e simplesmente apoiada noutra, com um comprimento de 7500mm e sujeita a cargas descendentes, segundo a Figura 48. Com uma sobreposição de 1400mm de comprimento na extremidade encastrada.

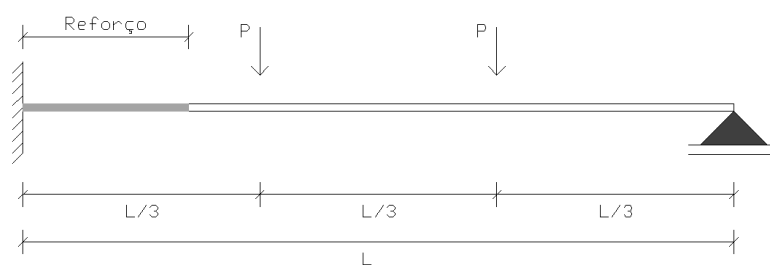


Figura 48 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 5.

O carregamento localiza-se a um terço do vão através de duas forças pontuais distribuídas na direcção yy nos nós da malha. O apoio duplo foi simulado restringindo o deslocamento em xx , yy e zz nos nós de localização dos parafusos e o no apoio encastrado foi restringido o deslocamento e rotação em xx , yy e em zz . Nos restantes nós de apoio foi restringido o deslocamento em zz (ver Figura 49).

A tensão de cedência do material, utilizada nesta simulação numérica, foi de 342 MPa. Este valor para a tensão de cedência foi obtido através de vários ensaios de tracção realizados em provetes extraídos da chapa utilizada no fabrico das madres ensaiadas.

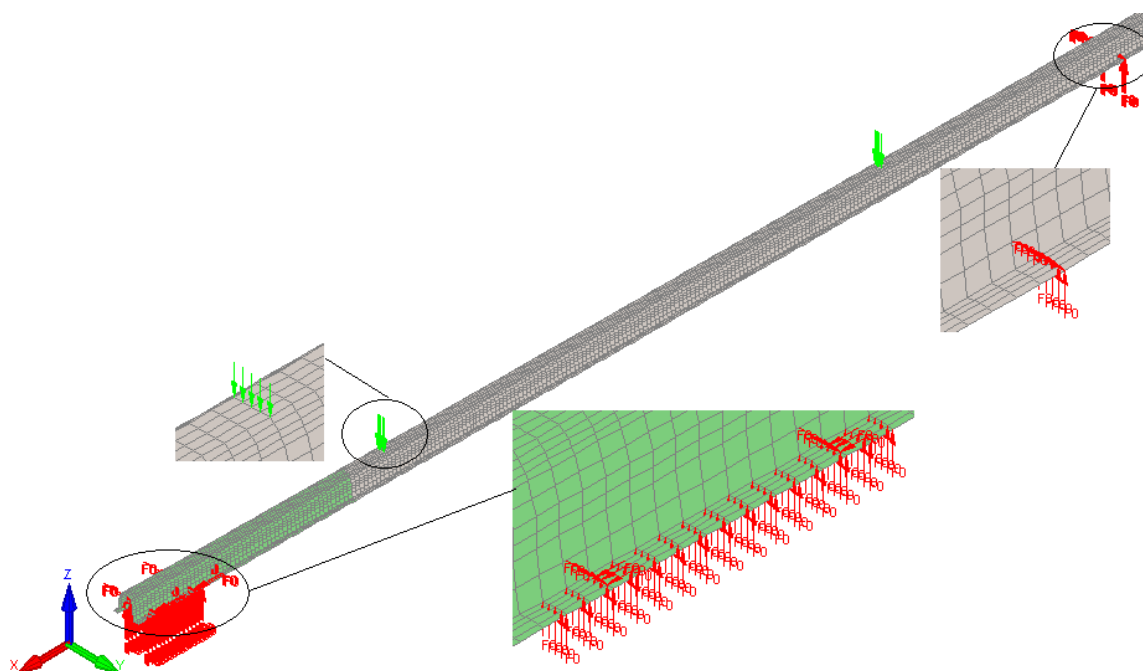


Figura 49 – Ensaio de flexão simples $\Omega 150 \times 1.5$ – Ensaio 5.

4.1.2.3. Ensaio 6

Ensaio de flexão simples à MadreMax $\Omega 150 \times 1.5$, com a madre encastrada em ambas as extremidades, com um comprimento de 7500mm e sujeita a cargas descendentes, segundo a Figura 50. Com uma sobreposição de 1400mm de comprimento em ambas as extremidades.

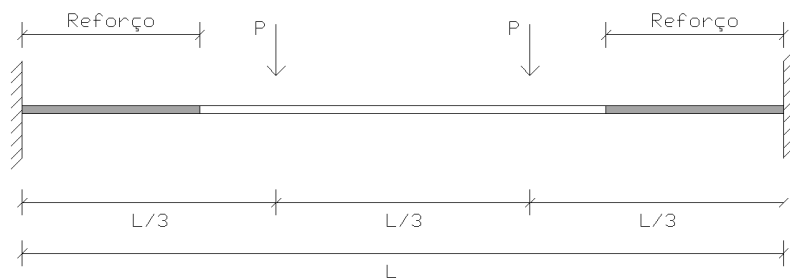


Figura 50 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 6.

O carregamento localiza-se a um terço do vão através de duas forças pontuais distribuídas na direcção yy e xx nos nós da malha. O apoio encastrado foi simulado restringindo o deslocamento e rotação em xx, yy e em zz, nos restantes nós de apoio foi restringido o deslocamento em zz (ver Figura 51).

A tensão de cedência do material, utilizada nesta simulação numérica, foi de 342 MPa. Este valor para a tensão de cedência foi obtido através de vários ensaios de tracção realizados em provetes extraídos da chapa utilizada no fabrico das madres ensaiadas.

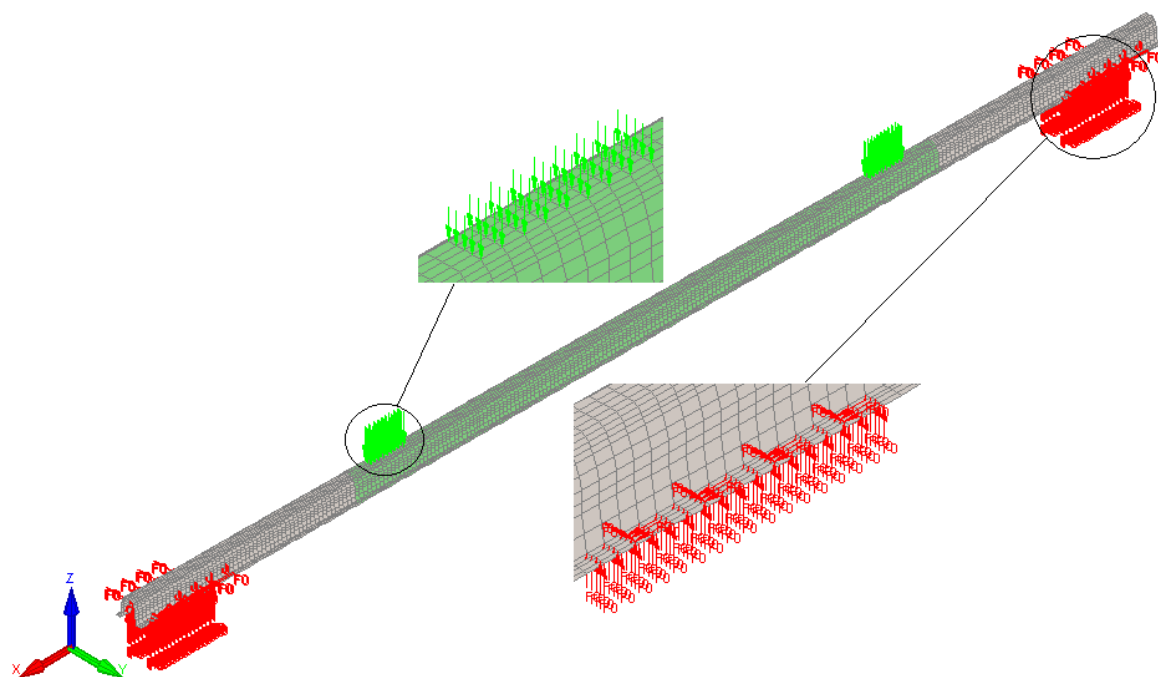


Figura 51 – Ensaio de flexão simples $\Omega 150 \times 1.5$ – Ensaio 6.

4.1.3. Ensaios numéricos à secção transversal $\Omega 200 \times 2.0$

Foram realizados dois ensaios numéricos à secção $\Omega 200 \times 2.0$, todos eles à flexão simples. De seguida apresentam-se as simulações numéricas realizadas, de forma pormenorizada.

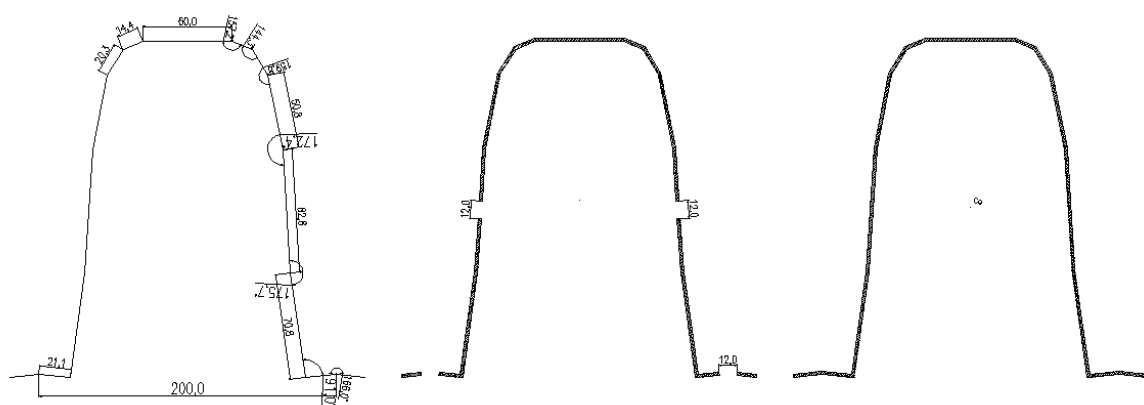


Figura 52 – Caracterização geométrica da secção $\Omega 200 \times 2.0$ [9]

4.1.3.1. Ensaio 7

Ensaio de flexão simples à MadreMax $\Omega 200 \times 2.0$, com a madre simplesmente apoiada, com um comprimento de 7500mm e sujeita a cargas descendentes, segundo a Figura 40.

O carregamento localiza-se a um terço do vão através de duas forças pontuais distribuídas na direcção yy e xx nos nós da malha. O apoio duplo foi simulado restringindo o deslocamento em xx, yy e zz nos nós de localização dos parafusos e o no apoio simples foi restringido o deslocamento em yy e em zz. Nos restantes nós de apoio foi restringido o deslocamento em zz (ver Figura 53).

A tensão de cedência do material, utilizada nesta simulação numérica, foi de 342 MPa. Este valor para a tensão de cedência foi obtido através de vários ensaios de tracção realizados em provetes extraídos da chapa utilizada no fabrico das madres ensaiadas.

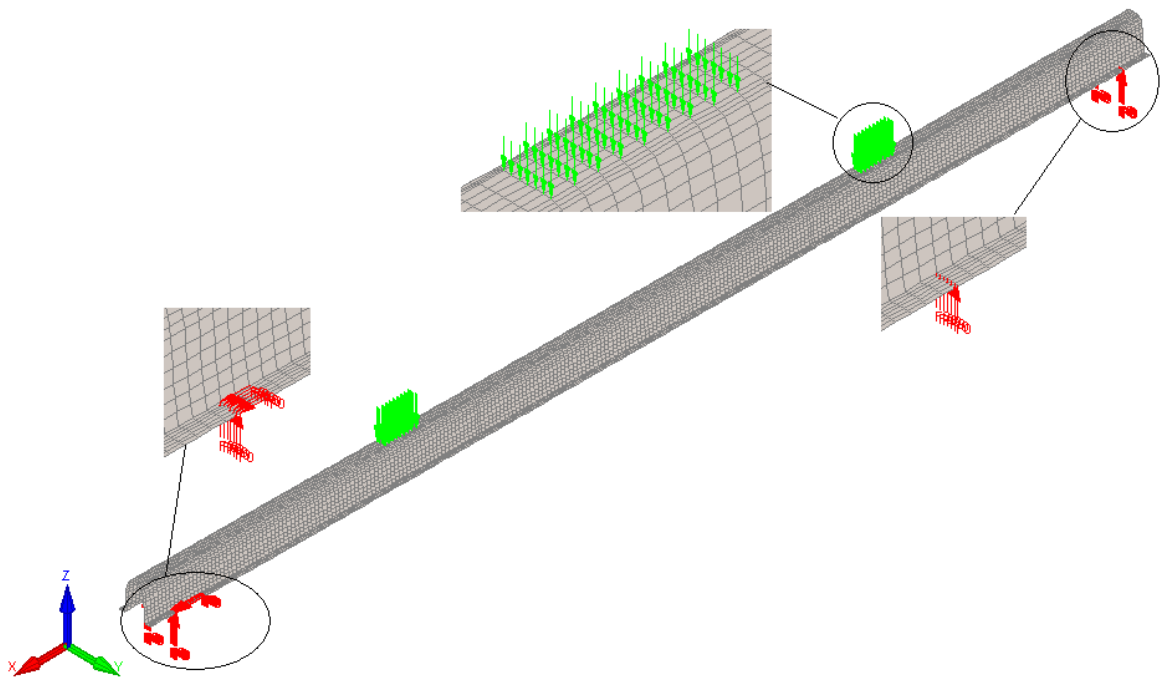


Figura 53 – Ensaio de flexão simples $\Omega 200 \times 2.0$ – Ensaio 7.

4.1.3.2. Ensaio 8

Ensaio de flexão simples à MadreMax $\Omega 200 \times 2.0$, com a madre encastrada numa das extremidades e livre na outra, com um comprimento de 1850mm e sujeita a cargas descendentes, segundo a Figura 54.

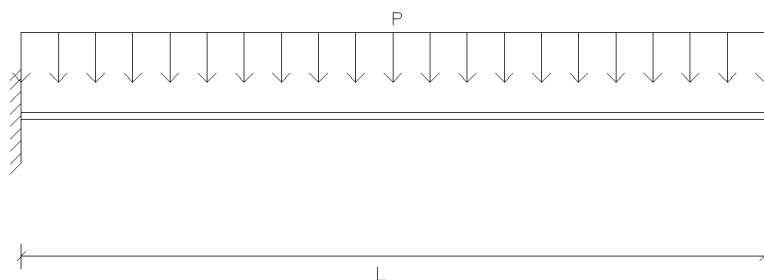


Figura 54 – Esquema de ensaio de flexão simples – Ensaio 8.

O carregamento é realizado através de duas forças pontuais distribuídas ao longo do comprimento da madre na direcção yy e xx . O apoio encastrado foi simulado restringindo o deslocamento e rotação em xx , yy e em zz , nos nós de apoio (ver Figura 55).

A tensão de cedência do material, utilizada nesta simulação numérica, foi de 320 MPa. Este é o valor da tensão de cedência para o aço do tipo S320GD+Z/ZD (segundo a norma EN 10326 [12]). Este ensaio não foi testado experimentalmente, por isso é que foi usada esta tensão de cedência.

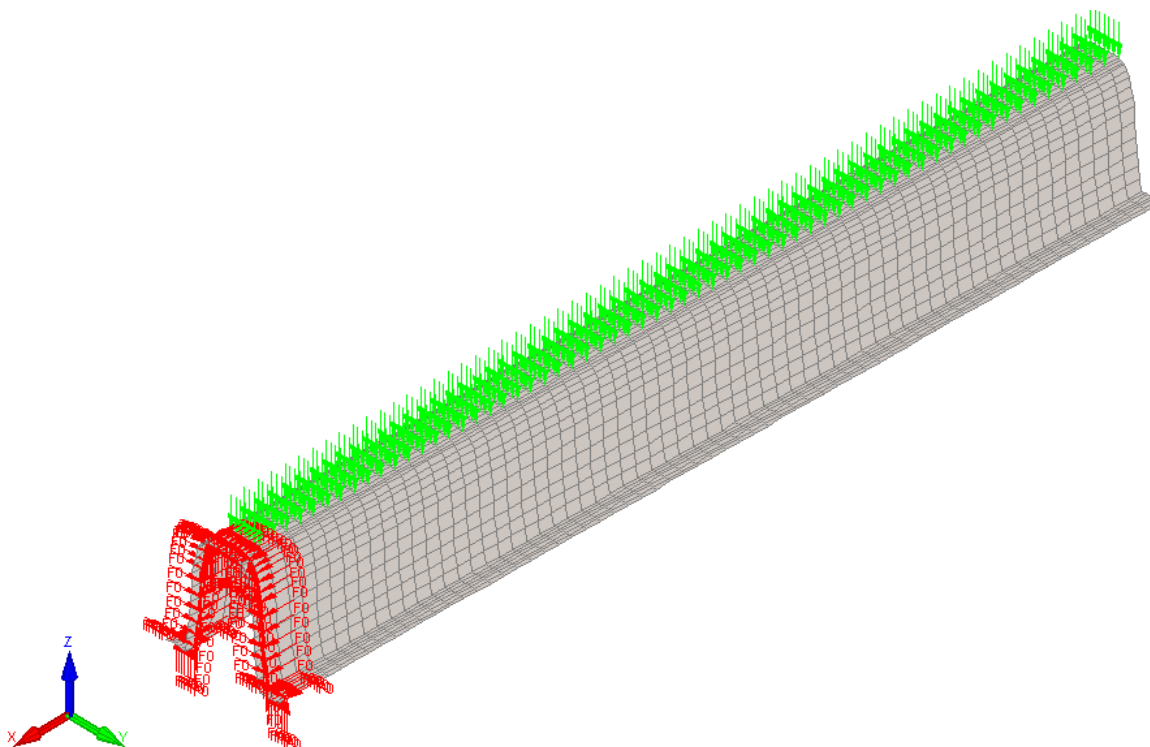


Figura 55 – Ensaio de flexão simples $\Omega 200 \times 2.0$ – Ensaio 8.

4.2. Análise de Resultados

Os resultados para os diversos ensaios numéricos descritos anteriormente são obtidos através do programa de elementos finitos SAFIR. Estes são apresentados de forma sucinta para as três secções transversais das madres enformadas a frio, MadreMax, sendo elas: $\Omega 100 \times 1.5$; $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$.

Relativamente aos ensaios numéricos da secção transversal, MadreMax, usou-se sempre a tensão de cedência real do material, de forma a simular-se o mais possível os ensaios experimentais realizados a esta secção, excepto nos ensaios numéricos que não tiveram como base os ensaios experimentais.

Em todas as simulações verificou-se um fenómeno de rotação da secção, sendo mais acentuada esta rotação nos ensaios com dois vãos em continuidade, quer no ensaio com recuso a reforço na zona central que no ensaio sem reforço. Este fenómeno de rotação é evidenciado pela comparação entre a Figura 56 e a Figura 57.

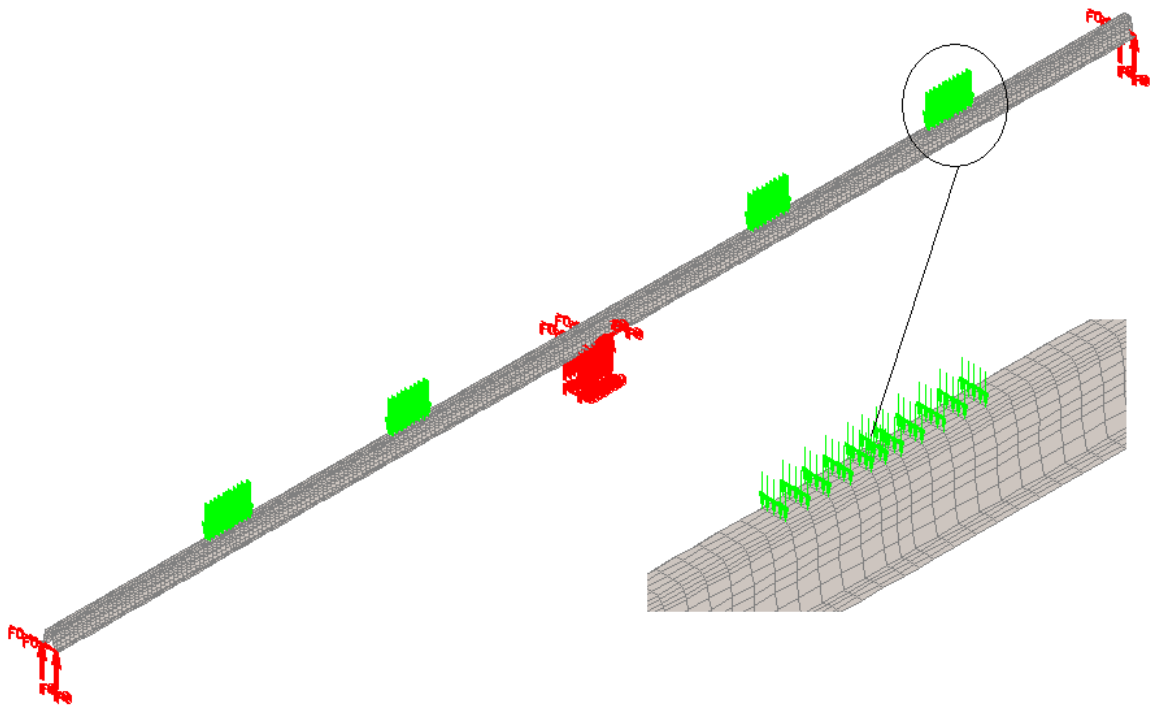


Figura 56 – Viga inicial da simulação do ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.

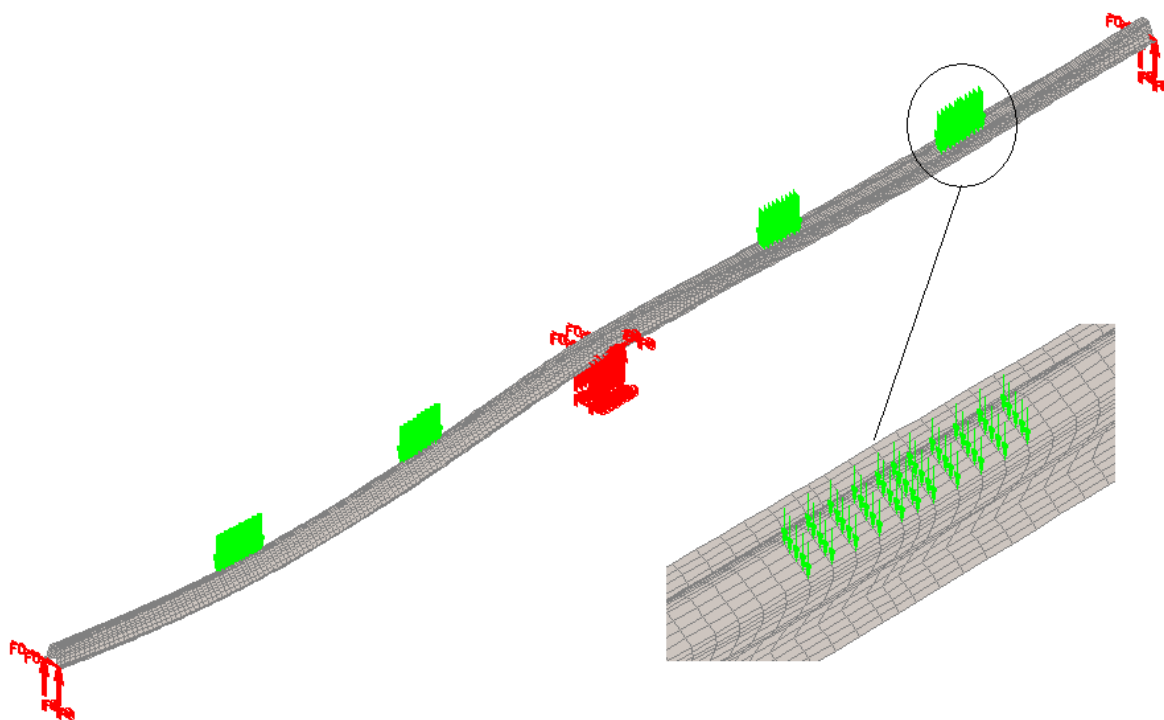


Figura 57 – Rotação da viga da simulação do ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1. Factor de escala de 3

Devido aos fenómenos de rotação anteriormente referidos e ao facto de todos os ensaios estarem sujeitos a cargas descendentes, observou-se num dos ensaios a formação de um vinco numa das almas da madre, como se evidencia na Figura 58.

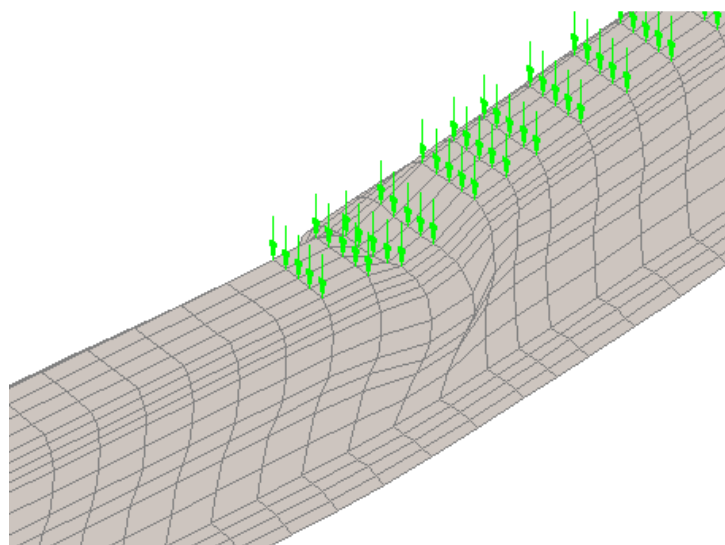


Figura 58 – Formação de um vinco numa das almas da madre no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.

A Figura 59 apresenta a relação força – deslocamento vertical para um nó a meio vão num ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1. A fase elástica contida no gráfico foi característica constante em todos os ensaios realizados, como esperado. Neste caso específico houve ainda lugar à formação de um pequeno patamar de cedência.

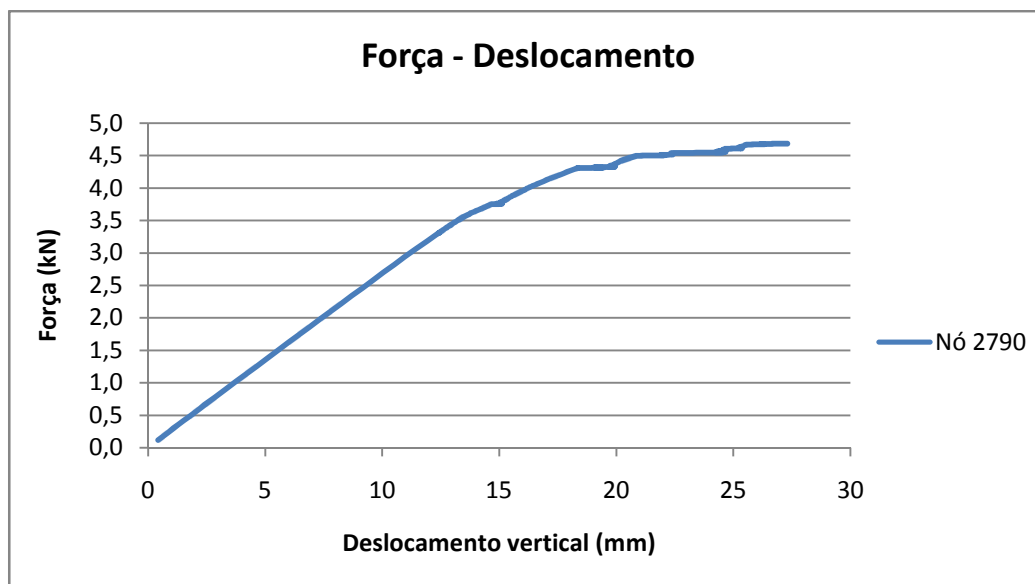


Figura 59 – Comportamento força - deslocamento num ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.

A quantificação da abertura das madres é realizada através da determinação da diferença dos deslocamentos horizontais de dois pontos, situados nos banzos livres e com o mesmo alinhamento, um na aba direita e outro na aba esquerda, na zona de aplicação da carga (ver Figura 60).

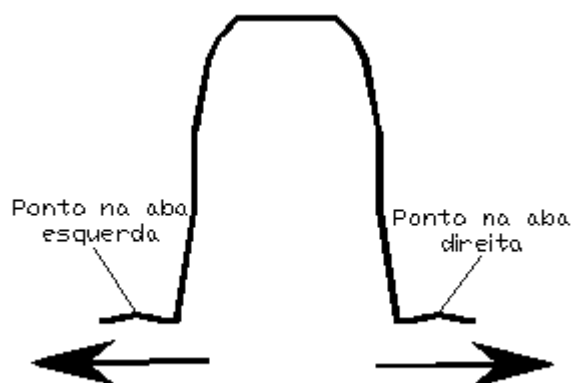


Figura 60 – Esquema de localização dos pontos de medição dos deslocamentos horizontais

É de notar que o comportamento é diferente para a secção $\Omega 100 \times 1.5$, pois na Figura 61 verifica-se, inicialmente a tendência da madre para fechar e posteriormente a sua abertura. Estes deslocamentos relativos horizontais são insignificantes.

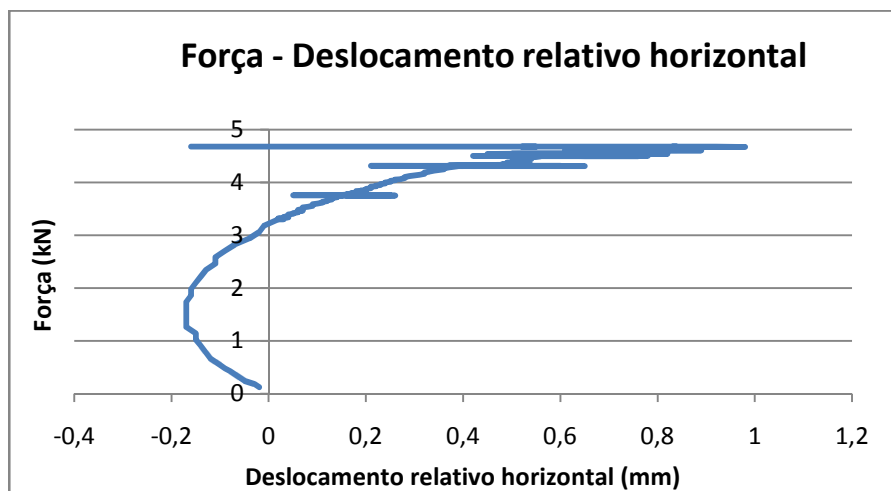


Figura 61 – Comportamento força - deslocamento relativo horizontal num ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1.5$ – Ensaio 1.

No que diz respeito às secções $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$, estas abrem até à carga de rotura (ver Figura 62), apresentado um comportamento elástico-plástico. Estes deslocamentos relativos horizontais são inferiores a 8mm.

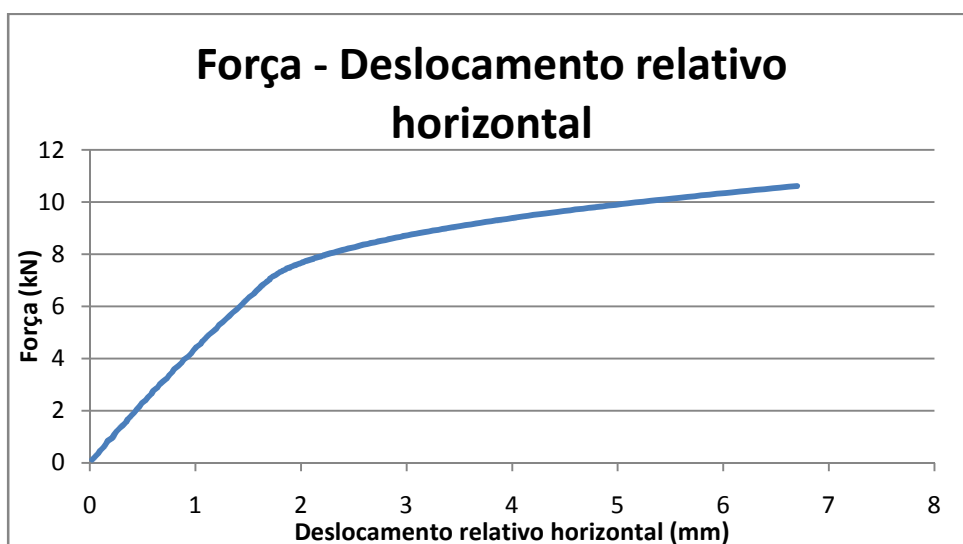


Figura 62 – Comportamento força - deslocamento relativo horizontal num ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 150 \times 1.5$ – Ensaio 6.

A rotação da secção pode ser evidenciada pelo deslocamento vertical de uma aba do banzo relativamente a outra no mesmo alinhamento da secção transversal da madre (ver Figura 63 e Figura 65).

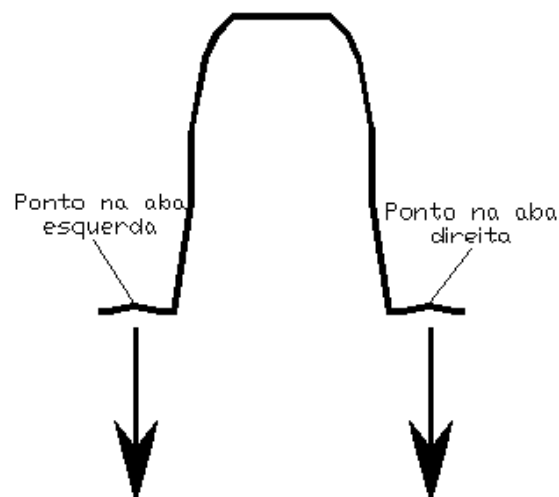


Figura 63 – Esquema de localização dos pontos de medição dos deslocamentos verticais

Na Figura 64 pode-se verificar que uma das abas apresenta um deslocamento vertical superior ao da outra aba. Caso não ocorresse rotação da secção estes dois deslocamentos seriam coincidentes, pois o deslocamento relativo horizontal entre os mesmos nós é insignificante.

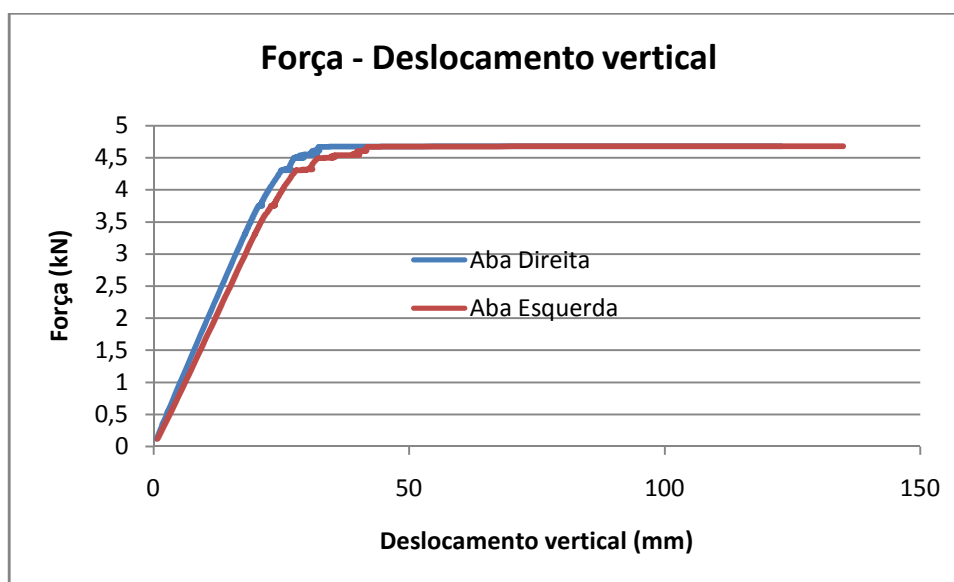


Figura 64 – Comportamento força - deslocamento vertical num ponto da aba direita e num ponto da aba esquerda no ensaio de flexão simples da secção $\Omega 100 \times 1,5$ – Ensaio 1.

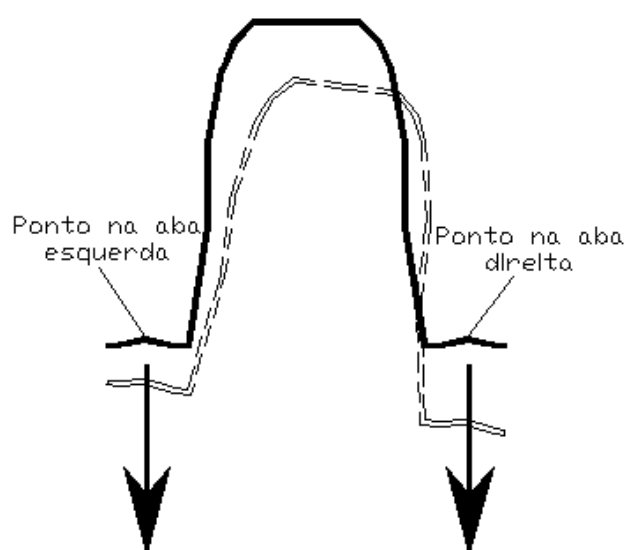
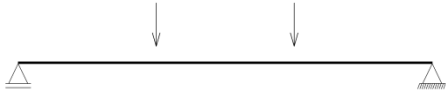


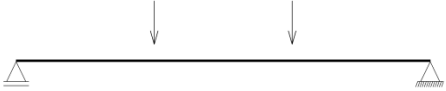


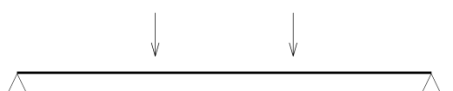
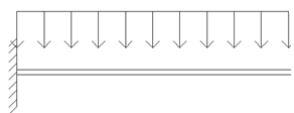


Figura 65 – Esquema rotação da secção transversal da madre

De seguida apresenta-se uma tabela de resumo dos resultados dos diferentes ensaios numéricos realizados às secções transversais das madres enformadas a frio, MadreMax, $\Omega 100 \times 1.5$, $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios numéricos

Secção MadreMax	Ensaio	Esquema Estrutural	Carga Última (kN)
$\Omega 100 \times 1.5$	Ensaio 1 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes		2,89
	Ensaio 2 – Ensaio de flexão simples – com dois vãos e em continuidade sem recurso a reforços na zona do apoio central, sujeita a cargas descendentes		4,34
	Ensaio 3 – Ensaio de flexão simples – com dois vãos e em continuidade com recurso ao reforço da zona sobre o apoio central através da sobreposição de MadreMax, sujeita a cargas descendentes		6,30
$\Omega 150 \times 1.5$	Ensaio 4 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes		2,6
	Ensaio 5 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada numa das extremidades e simplesmente apoiada noutra, com reforço por sobreposição na extremidade encastrada, sujeita a cargas descendentes		4,08
	Ensaio 6 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada em ambas as extremidades, com reforço por sobreposição em ambas as extremidades, sujeita a cargas descendentes		10,62
$\Omega 200 \times 2.0$	Ensaio 7 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes		12
	Ensaio 8 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada numa das extremidades e livre na outra, sujeita a cargas descendentes		9,96 kN/m

4.3. Comparação com os ensaios experimentais

Em primeiro lugar é importante salientar que de todos os ensaios numéricos expostos nesta dissertação, apenas dois não foram ensaiados também experimentalmente, o Ensaio 4 (ensaio de flexão simples à secção $\Omega 150 \times 1.5$ simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes) e o Ensaio 8 (ensaio de flexão simples à secção $\Omega 200 \times 2.0$ com a MadreMax encastrada numa das extremidades e livre na outra, sujeita a cargas descendentes). Por isso os resultados destes dois ensaios não serão comparados com os ensaios experimentais.

Com já foi dito anteriormente os ensaios experimentais foram realizados no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no LabEst – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural (ver Figura 66) e no LERF – Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (ver Figura 67). Os resultados destes ensaios experimentais, bem como, a descrição dos ensaios, encontra-se sintetizada no Relatório de Ensaios I e II Fase [21] e no Relatório de Ensaios III Fase [20] e [22].

Todos estes ensaios experimentais foram acompanhados ao longo sua realização, de forma a retratar as condições experimentais o mais possível nos ensaios numéricos.



Figura 66 – Exemplo de um ensaio experimental realizado no LabEst – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural [22].



Figura 67 – Exemplo de um ensaio experimental realizado no no LERF – Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo [22].

O comportamento obtido nos ensaios numéricos foi semelhante ao comportamento obtido nos ensaios experimentais, nomeadamente a ocorrência de fenómenos de rotação (ver Figura 68), deformação localizada nos pontos de aplicação da carga (ver Figura 69), deslocamentos relativos horizontais mínimos, foram evidenciados em ambos os ensaios, quer nos experimentais, quer nos numéricos.

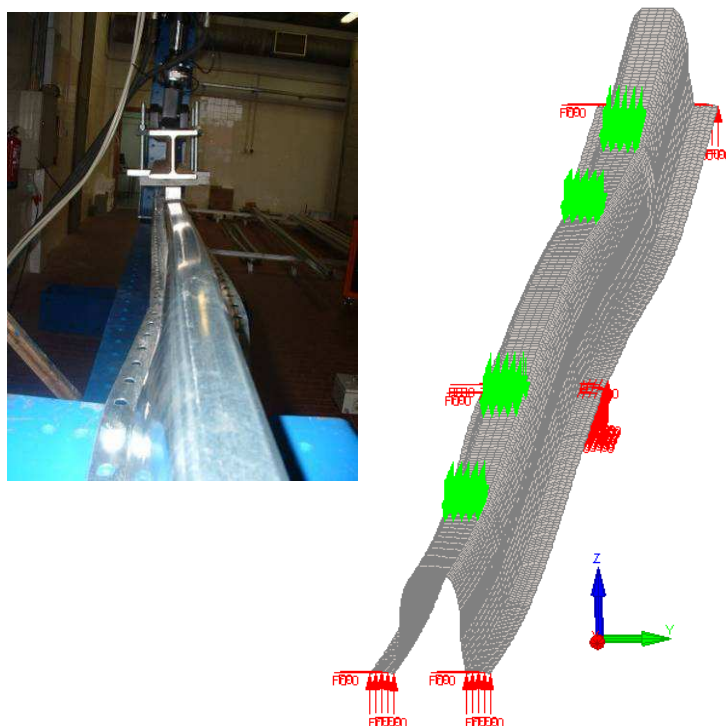


Figura 68 – Pormenor da rotação da secção do perfil MadreMax – Ensaio experimental vs Ensaio numérico (Ensaio 1).

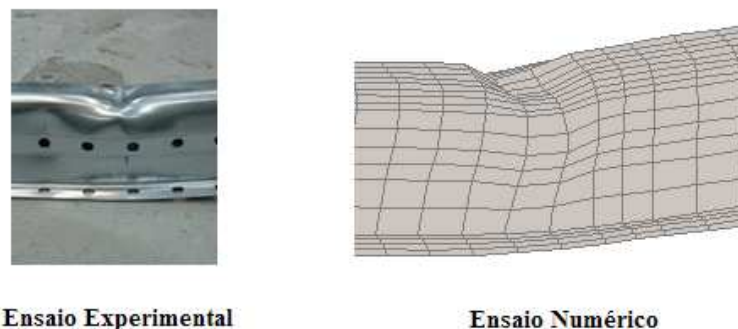


Figura 69 – Pormenor da deformação localizada nos pontos de aplicação da carga – Ensaio experimental vs Ensaio numérico (Ensaio 1).

Relativamente aos ensaios de flexão simples à secção $\Omega 100 \times 1.5$, a carga última atingida nos ensaios numéricos, apenas é superior à carga última experimental, no Ensaio 3 (ensaio com dois vãos e em continuidade com recurso ao reforço da zona sobre o apoio central através da sobreposição de MadreMax, sujeita a cargas descendentes). Neste ensaio experimental o reforço é realizado através da sobreposição de MadreMax com recurso a parafusos M10 de classe 8.8 [23] espaçados de 50cm entre eles (ver Figura 22 e Figura 23), enquanto no ensaio numérico o reforço foi simulado através da colocação, nessa zona, de um elemento de casca com o dobro da espessura relativamente ao resto da viga, garantindo a continuidade total. Assim se justifica o facto de no ensaio numérico se obter uma carga última mais elevada do que no ensaio experimental.

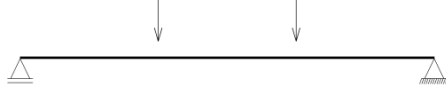




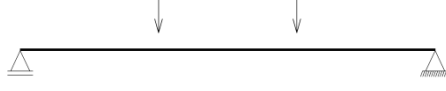
No que diz respeito ao Ensaio 2 (ensaio de flexão simples à secção $\Omega 100 \times 1.5$ com dois vãos e em continuidade sem recurso a reforços na zona do apoio central, sujeita a cargas descendentes), a carga última numérica é praticamente igual à carga última experimental. O mesmo já não acontece no Ensaio 1 (ensaio de flexão simples simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes), em que a carga última numérica é sensivelmente 42% da carga última experimental. Este resultado pode dever-se ao facto de as condições experimentais não terem sido completamente bem simuladas numericamente e ainda a problemas numéricos.

Relativamente aos ensaios de flexão simples à secção $\Omega 150 \times 1.5$, a carga última atingida nos ensaios numéricos, não é superior à carga última experimental, no Ensaio 5 (ensaio com a MadreMax encastrada numa das extremidades e simplesmente apoiada noutra, com reforço por sobreposição na extremidade encastrada, sujeita a cargas descendentes). Este resultado pode dever-se a problemas numéricos. No Ensaio 6 (ensaio com a MadreMax encastrada em ambas as extremidades, com reforço por sobreposição em ambas as extremidades, sujeita a cargas descendentes), mais uma vez a carga última numérica é superior a carga última experimental por causa da simulação do reforço garantir mais a continuidade do que o reforço realizado através da

sobreposição de MadreMax com recurso a parafusos M10 de classe 8.8 [23] espaçados de 50cm entre eles.

No que diz respeito ao ensaio de flexão simples à secção $\Omega 200 \times 2.0$, a carga última atingida nos ensaios numéricos, é aproximadamente igual à carga última experimental, no Ensaio 7 (ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes).

Tabela 8 – Resultados dos ensaios numéricos vs ensaios experimentais

Secção MadreMax	Ensaio	Esquema Estrutural	Carga Última Numérica (kN)	Carga Última Experimental (kN)
$\Omega 100 \times 1.5$	Ensaio 1 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes		2,89	5,0
	Ensaio 2 – Ensaio de flexão simples – com dois vãos e em continuidade sem recurso a reforços na zona do apoio central, sujeita a cargas descendentes		4,34	4,45
	Ensaio 3 – Ensaio de flexão simples – com dois vãos e em continuidade com recurso ao reforço da zona sobre o apoio central através da sobreposição de MadreMax, sujeita a cargas descendentes		6,30	5,30
$\Omega 150 \times 1.5$	Ensaio 5 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada numa das extremidades e simplesmente apoiada noutra, com reforço por sobreposição na extremidade encastrada, sujeita a cargas descendentes		4,08	5,35
	Ensaio 6 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada em ambas as extremidades, com reforço por sobreposição em ambas as extremidades, sujeita a cargas descendentes		10,62	7,8
$\Omega 200 \times 2.0$	Ensaio 7 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes		12	11,9

4.4. Comparação com os resultados analíticos

De forma a conhecer o comportamento da madre nos ensaios numéricos, foi realizado um cálculo à carga última máxima teórica. O cálculo das cargas últimas previstas foi realizado para todos os ensaios numéricos realizados às secções $\Omega 100 \times 1.5$, $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$.

Os valores obtidos para a carga última analítica devem-se, unicamente, à rotura do elemento por perda da resistência da secção transversal. Estes valores dependem de vários factores, nomeadamente, da posição de aplicação das cargas pontuais e da distância entre os eixos dos apoios. O valor da tensão de cedência do aço utilizado no cálculo da carga última analítica foi a tensão real do material utilizado nos ensaios experimentais, excepto em dois ensaios, o Ensaio 4 e o Ensaio 8. Nestes dois casos foi usado a tensão de cedência de 320 MPa (tensão de cedência para o aço do tipo S320GD+Z/ZD segundo a norma EN 10326 [12]), porque não forem testados experimentalmente.

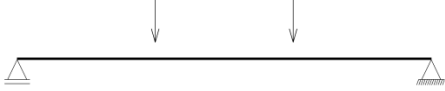

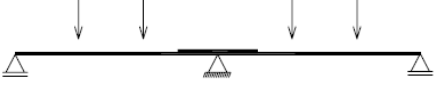
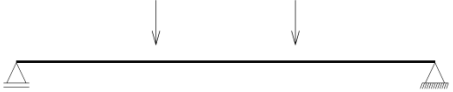


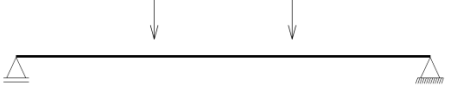
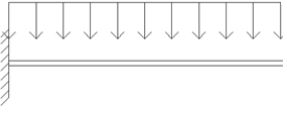
Relativamente aos ensaios de flexão simples à secção $\Omega 100 \times 1.5$, a carga última atingida nos ensaios numéricos, é sempre superior à carga última analítica, excepto no Ensaio 1 (ensaio de flexão simples simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes). Esta não conformidade acontece também com os ensaios experimentais e mais uma vez pode ser causado pelo facto de as condições experimentais e analíticas não terem sido completamente bem simuladas numéricas e devido a problemas numéricos. É de salientar que no Ensaio 3 (ensaio com dois vãos e em continuidade com recurso ao reforço da zona sobre o apoio central através da sobreposição de MadreMax, sujeita a cargas descendentes) o valor da carga última numérica é consideravelmente superior ao valor da carga última analítica, demonstrando assim a boa transferência de esforços com a continuidade realizada através do reforço.

Relativamente aos ensaios de flexão simples à secção $\Omega 150 \times 1.5$, a carga última atingida nos ensaios numéricos, apenas não é superior à carga última analítica, no Ensaio 5 (ensaio com a MadreMax encastrada numa das extremidades e simplesmente apoiada noutra, com reforço por sobreposição na extremidade encastrada, sujeita a cargas descendentes). Este resultado pode dever-se a problemas numéricos. No Ensaio 6 (ensaio com a MadreMax encastrada em ambas as extremidades, com reforço por sobreposição em ambas as extremidades, sujeita a cargas descendentes) mais uma vez a carga última numérica é consideravelmente superior a carga última analítica.

No que diz respeito ao ensaio de flexão simples à secção $\Omega 200 \times 2.0$, a carga última atingida nos ensaios numéricos, é aproximadamente igual à carga última analítica, no Ensaio 7 (ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes). No Ensaio 8 (ensaio com a

MadreMax encastrada numa das extremidades e livre na outra, sujeita a cargas descendentes) o mesmo já não acontece, pois a carga última numérica é inferior a carga última analítica.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios numéricos vs ensaios analíticos

Secção MadreMax	Ensaio	Esquema Estrutural	Carga Última Numérica (kN)	Carga Última Analítica (kN)
$\Omega 100 \times 1.5$	Ensaio 1 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes		2,89	3,6
	Ensaio 2 – Ensaio de flexão simples – com dois vãos e em continuidade sem recurso a reforços na zona do apoio central, sujeita a cargas descendentes		4,34	3,00
	Ensaio 3 – Ensaio de flexão simples – com dois vãos e em continuidade com recurso ao reforço da zona sobre o apoio central através da sobreposição de MadreMax, sujeita a cargas descendentes		6,30	4,95
$\Omega 150 \times 1.5$	Ensaio 4 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes		2,60	2,41
	Ensaio 5 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada numa das extremidades e simplesmente apoiada noutra, com reforço por sobreposição na extremidade encastrada, sujeita a cargas descendentes		4,08	5,45
	Ensaio 6 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada em ambas as extremidades, com reforço por sobreposição em ambas as extremidades, sujeita a cargas descendentes		10,62	9,6
$\Omega 200 \times 2.0$	Ensaio 7 – Ensaio de flexão simples – simplesmente apoiado, sujeita a cargas descendentes		12	11,6
	Ensaio 8 – Ensaio de flexão simples – com a MadreMax encastrada numa das extremidades e livre na outra, sujeita a cargas descendentes		9,96 kN/m	11,4 kN/m

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões finais

Este capítulo finaliza a dissertação com uma análise ao trabalho desenvolvido na tese, com uma chamada de atenção para os pontos importantes e de maior destaque.

A presente dissertação teve como principal objectivo aprofundar o conhecimento do comportamento das madres enformadas a frio MadreMax. Assim, através de modelos numéricos apresentou-se a verificação do comportamento á encurvadura e do comportamento dos reforços utilizados para aumentar a capacidade resistente das MadreMax.

Relativamente aos resultados numéricos obtidos para as secções $\Omega 100 \times 1.5$, $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$ comparativamente aos ensaios experimentais e aos ensaios analíticos, estes apenas apresentam anomalias em três ensaios, no ensaio de flexão simples à secção $\Omega 100 \times 1.5$ simplesmente apoiado sujeita a cargas descendentes, no ensaio de flexão simples à secção $\Omega 150 \times 1.5$ com a MadreMax encastrada numa das extremidades e simplesmente apoiada noutra, com reforço por sobreposição na extremidade encastrada, sujeita a cargas descendentes e no ensaio de flexão simples à secção $\Omega 200 \times 2.0$ com a MadreMax encastrada numa das extremidades e livre na outra, sujeita a cargas descendentes. Nos restantes casos, o comportamento das madres em termos de resistência não apresentam qualquer tipo de anomalias, pois os resultados dos ensaios numéricos superam os resultados quer dos ensaios experimentais quer dos ensaios analíticos.

Na generalidade dos casos, registaram-se resultados numéricos concordantes com os modelos experimentais e analíticos, pelo que os critérios de modelação adoptados foram satisfatórios e servindo à verificação do comportamento de madres enformadas a frio, nomeadamente, as madres MadreMax.

De acordo com os resultados apresentados no capítulo 4, conclui-se que ocorre o colapso por encurvadura lateral e por encurvadura local, para os ensaios de flexão simples com a MadreMax sujeita a cargas descendentes. Na prática, isto é, em obra este colapso por encurvadura lateral é atenuado pela existência dos painéis de revestimento de cobertura que conferem um certo grau de contraventamento. A verificação da segurança das madres relativamente ao fenómeno de encurvadura local está automaticamente assegurada uma vez que as secções transversais são de classe 4, sendo a determinação do valor de cálculo dos esforços resistentes efectuada com base nas secções efectivas.

No que diz respeito ao reforço por sobreposição de madres, concluiu-se que a simulação da sobreposição através da duplicação da secção transversal simula satisfatoriamente a correspondente montagem experimental, como se pode verificar através da comparação dos ensaios numéricos com os experimentais nos ensaios com sobreposição de madres. Nos ensaios experimentais o reforço é realizado através da sobreposição de MadreMax com recurso a parafusos M10 espaçados de 50cm entre eles, enquanto nos ensaios numéricos o reforço foi simulado através da colocação, nessa zona, de um elemento de casca com o dobro da espessura relativamente ao resto da viga, garantindo a continuidade total.

É de salientar, que em situações reais é corrente a colocação de reforço por sobreposição não só sobre o apoio, mas também a meio vão, situação que não foi testada nos ensaios numéricos. Também não foi testada a secção transversal com inclinação, situação esta, que ocorre na maioria das coberturas. Assim, nestes ensaios numéricos apenas se testou o eixo forte da secção transversal sujeita a cargas descendentes.

Quanto aos deslocamentos relativos horizontais dos banzos livres obtidos nos diversos ensaios numéricos, conclui-se que a abertura da secção transversal das madres enformadas a frio, MadreMax, pode ser negligenciável.

Embora reconhecendo a necessidade de mais ensaios, os efectuados permitem evidenciar um bom comportamento das madres enformadas a frio, MadreMax, sujeitas a cargas descendentes, desde que os painéis de revestimento de cobertura confirmem rigidez transversal que dificulte a ocorrência de encurvadura lateral.

5.2. Desenvolvimentos futuros

O estudo de alguns dos aspectos focados pode ser merecedor de mais detalhe em pesquisas futuras, tendo em vista a evolução do conhecimento do comportamento das madres enformadas a frio MadreMax.

Todos os ensaios numéricos realizados neste trabalho, para madres enformadas a frio, foram realizados para cargas descendentes. O estudo do comportamento das madres sujeitas a cargas ascendentes, julga-se necessário.

Nesta tese foi abordada a flexão simples, por isso julga-se necessário em desenvolvimentos futuros estudar o comportamento das madres à flexão desviada, à compressão e a flexão composta de forma a permitir um conhecimento mais aprofundado deste tipo de madres enformadas a frio.

Por fim, devem ser desenvolvidos estudos para as novas secções transversais MadreMax, $\Omega 50 \times 1.5$, $\Omega 200 \times 1.5$ e $\Omega 250 \times 2.5$, já que nesta tese apenas foram estudadas três secções transversais das madres enformadas a frio, MadreMax, sendo elas: $\Omega 100 \times 1.5$; $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$. Bem como o estudo de futuras tipologias estruturais (pilares, vigas, asnas treliçadas, calanderização do perfil MadreMax).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Constálica S.A.. Catálogo comercial MadreMax – tabelas de pré-dimensionamento, 2006.
- [2] CEN, European Committee for Standardisation. EN 1993-1-3. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-3. General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels, Belgium, 2004.
- [3] Silvestre, N.; Camotim, D. – Inovação e Tecnologia - Estruturas de aço enformadas e frio, utilização, comportamento e dimensionamento de acordo com o EC3-1-3. Revista Engenharia e Vida, n.º30. Dezembro 2006.
- [4] Jardim, G.; Campos, A. – Light steel framing. Uma aposta no sector siderúrgico no desenvolvimento tecnológico da construção civil.
- [5] CEN, European Committee for Standardisation. EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1. General rules and rules buildings. Brussels, Belgium, 2005.
- [6] Vila Real, P. - Incêndio em estruturas metálicas. Lisboa: Edições Orion, 2003.
- [7] Gervásio, H.; Simões da Silva, L.; Simão, P. - Dimensionamento de elementos metálicos com perfis enformados a frio de acordo com a parte 1.3 do Eurocódigo 3. IV Congresso de Construção Metálica e Mista, Lisboa, Dezembro de 2003.
- [8] CEN, European Committee for Standardisation. EN 1993-1-5. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-5. Plated structural elements. Brussels, Belgium, 2003.
- [9] Constálica S.A.. Sítio da internet, 2008. www.constalica.pt.
- [10] Vila Real, P.; Lapa, J.; Oliveira, F.; Lopes, N. – Estudo de secções metálicas enformadas a frio para execução de MadreMax - Fase I - Caracterização geométrica das secções com vista ao dimensionamento simples através do disposto no Eurocódigo 3, requerido pela

empresa Constálica – Elementos de Construção Metálicos, Lda, realizado na Universidade de Aveiro, Setembro de 2005.

- [11] Nolasco, A. – Análise Experimental de madres enformadas a frio. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.
- [12] Lopes, N.; Oliveira, F.; Pires, B.; Vila Real, P. – “MadreMax, um sistema inovador de madres enformadas a frio - exemplo de cooperação Universidade-Indústria”, actas do Congresso Construção 2007, resumo pp. 53 e artigo em CD, ISBN 972-49-2008-9, Coimbra, Portugal, 17 a 19 de Dezembro de 2007.
- [13] CEN, European Committee for Standardisation. EN 10326. Continuously hot-dip coated strip and sheet of structural steels – Technical delivery conditions. Brussels, Belgium, 2004.
- [14] Outinen, J.; Perttola, H.; Hara, R.; Kupari, K.; Kaitila, O. – Seminar on Steel Structures: DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Laboratory of Steel Structures, Helsinki, 2000.
- [15] Sítio da internet. <http://gid.cimne.upc.es/intro/>
- [16] Franssen, J.; Kodur, V.; Mason, J. – User's manual for safir 2004. A computer program for analysis of strutures subjected to fire. Liege, 2004.
- [17] Lopes, N. – Final report of the research activity developed in the University of Liege, Belgium – Numerical and experimental work on the behaviour of steel construction submitted to fire. Calouste de Gulbenkian Foundation, Setembro de 2007.
- [18] Franssen, J.; Kodur, V.; Mason, J. – Elements of theory for safir 2002 - A computer program for analysis of strutures submitted to the fire. University of Liege. Liege, 2002.
- [19] Doneux, C.; Franssen, J. – 2D Constitutive models for the shell elements of the finite element software SAFIR. Liege, 2003.

- [20] Vila Real, P.; Lopes, N.; Nolasco, A.; Amaral, C. – Ensaaios às madres $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$: sistema MadreMax. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. Aveiro : Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo, 2008.
- [21] Nolasco, A. - Relatórios de Ensaaios – Fase I e II, perfis enformados a frio: sistema MadreMax. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. Aveiro: Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo, 2008.
- [22] Vila Real, P.; Lopes, N. – Conclusões finais aos ensaios realizados às madres enformadas a frio do sistema MadreMax, requerido pela empresa Constálica – Elementos de Construção Metálicos, S.A., realizado no Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo (LERF) da Universidade de Aveiro, Setembro de 2008.
- [23] CEN, European Committee for Standardisation. EN 1993-1-8. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-8. Design of joints. Brussels, Belgium, 2005.
- [24]. Sítio da internet. http://gid.cimne.upc.es/support_team/gid_toc/gid_11.html#SEC181
- [25] Prola, L.; Pierin, I. – Resistência última de pilares de aço formados a frio pela análise linear de estabilidade.
- [26] Simões da Silva, L.; Santos, F. – Estudo da viabilidade económica dos enformados a frio em pórticos industriais com travessas inclinadas. Lisboa, 2005.
- [27] Chodraui, G.; Malite, M. – Flambagem por distorção da secção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada e flexão. São Carlos : Cadernos de Engenharia de Estruturas, 2007.
- [28] CEN, European Committee for Standardisation. EN 1993-1-2. Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, 2005.
- [29] Farinha, J.; Farinha, M.; Farinha, J.P.; Reis, A. – Tabelas Técnicas. Lisboa : Edições Técnicas E. T. L., 2003.

- [30] CEN, European Committee for Standardisation. prEN 1090-2: 2005 – Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for the execution of steel structures.

- [31] Vila Real, P.; Lopes, N.; Pires, B.; Oliveira, F. – Estudo de secções metálicas enformadas a frio para execução de MadreMax - Fase II - Elaboração de um programa de cálculo automático para verificação da segurança das madres, requerido pela empresa Constálica – Elementos de Construção Metálicos, Lda, realizado na Universidade de Aveiro, Fevereiro de 2007.